

INTEGRIERTE HEIZSTRUKTUREN IN LEITERPLATTEN

DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

DER

UNIVERSITÄT ROSTOCK

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002553

ERSTGUTACHTER: PROF. DR.-ING. HABIL. MATHIAS NOWOTTNICK

EINRICHTUNG: UNIVERSITÄT ROSTOCK / INSTITUT FÜR GERÄTESYSTEME UND SCHALTUNGSTECHNIK

ZWEITGUTACHTER: PROF. DR.-ING. HABIL. THOMAS ZERNA

EINRICHTUNG: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN / ZENTRUM FÜR MIKROTECHNISCHE PRODUKTION

VORGELEGT VON

DIPL.-ING. DIRK SEEHASE | GEB. AM 27.11.1983 IN WISMAR

AUS ROSTOCK

ROSTOCK | 26.06.2019 (ABGABE) | 09.09.2019 (VERTEIDIGUNG)

DISSERTATION

UNIVERSITÄT ROSTOCK

FAKULTÄT FÜR INFORMATIK UND ELEKTROTECHNIK

Lebenslauf: Dirk Seehase

Adresse: Am Kabutzenhof 3, 18057 Rostock
Telefon: 0178 5396751
E-Mail: dirk.seehase@uni-rostock.de
Geburtsdatum / -ort: 27.11.1983 / Wismar
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: Deutsch

BERUFLICHER WERDEGANG

03/2011 – 05/2011	wissenschaftliche Hilfskraft Uni Rostock / IEF / IGS
06/2011 – 11/2014	wissenschaftlicher Mitarbeiter Uni Rostock / IEF / IGS <input type="checkbox"/> Forschungsprojekt „ThermoFlux“
01/2015 – 09/2015	wissenschaftlicher Angestellter Steinbeis-Transferzentrum AVT / Rostock
12/2014 – 09/2015	wissenschaftliche Hilfskraft Uni Rostock / IEF / IGS
09/2015 – 09/2018	wissenschaftlicher Mitarbeiter Uni Rostock / IEF / IGS <input type="checkbox"/> Kooperationsprojekt „INHaLT“
09/2015 – heute	wissenschaftlicher Mitarbeiter Uni Rostock / IEF / IGS <input type="checkbox"/> Kooperationsprojekt „INHaLT“ (10/2015 – 10/2018) <input type="checkbox"/> Forschungsprojekt „ERFEB“ (11/2017 - heute)

AUSBILDUNG

09/1994 – 06/2003

Abitur

Geschwister-Scholl Gymnasium, Wismar

Abschluss: **Abitur**

10/2003 – 02/2011

Studium „Elektrotechnik“

Universität Rostock

Diplom-Thema: Herstellung und Charakterisierung eines
Heizers mit einem integrierten
Temperaturfühler in Dünnschichttechnik

Abschluss: **Diplom-Ingenieur**

10/2011 – 09/2019

Promotionsstudium „Elektrotechnik“

Dissertations-Thema: Integrierte Heizstrukturen in
Leiterplatten

Abschluss: **Doktor-Ingenieur** („magna cum laude“)

BESONDERE KENNTNISSE

EDV-Kenntnisse

CAD-Software (Eagle, CircuitCAM, Planmaster, Inventor,
u.a.)

FEM-Software (COMSOL Multiphysics, 6sigmaET, u.a.)

Bildbearbeitung (fortgeschritten)

3D-Modellierung (Grundkenntnisse)

Programmierung (C)

Sprachkenntnisse

Englisch (fließend), Französisch (Grundkenntnisse),

Klingonisch (Grundkenntnisse)

Führerschein

Klasse B

HOBBYS & INTERESSEN

Hobbys

LARP, Tabletop/Brettspiele, Basteln, Joggen

Rostock, 24.10.2019

*I rather believe that time is a companion who goes with us on the journey
and reminds us to cherish every moment
because they'll never come again.
What we leave behind is not as important as how we've lived.*

Captain Jean-Luc Picard (2371)

DANKSAGUNG

An dieser Stelle ist es mir ein Bedürfnis meinen herzlichsten Dank an die zahlreichen Personen zum Ausdruck zu bringen, ohne deren Mithilfe und Unterstützung die Anfertigung dieser Promotionsschrift in dieser Form nicht hätte realisiert werden können.

Bedanken möchte ich mich vor allem bei...

- Prof. Mathias Nowotnick für die Chance diese Promotion unter seiner Leitung durchzuführen, für die thematischen und wissenschaftlichen Hinweise und Ideen, für die konstruktiven Gespräche und für das entgegengebrachte Vertrauen.
- Prof. Thomas Zerna für die hilfsbereite und wissenschaftliche Begutachtung dieser Arbeit.
- Dr. Andrej Novikov für die wertvollen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit, sowie für die vielen produktiven Diskussionen und Inspirationen in meiner bisherigen Forschungstätigkeit.
- Bernd Müller, Martin Franke, Rüdiger Knoke, Peter Frühauf, Dirk Wormuth, Dr. Matthias Heimann und allen weiteren KollegInnen von der Siemens CT (Berlin), für die Möglichkeit diese Promotion im Rahmen einer Kooperation durchführen zu können, sowie für die finanzielle und fachliche Unterstützung dieser Forschungsarbeit.
- Michael Otto, Britta Wederka, Dr. Fred Lange, Jacob Maxa, Arne Neiser, Dr. Haldor Hartwig und allen weiteren KollegInnen des Institutes für Gerätesysteme und Schaltungstechnik für die vielfältige Unterstützung und die konstruktiven Hinweise bei praktischen Arbeiten.

Ich danke Heidi Klawitter und Herfried Loose für ihre Mühe und die Bereitschaft des Korrekturlesens dieser Arbeit.

Tief verbunden und dankbar bin ich meiner Freundin, Cindy Maria Berles, für ihre Hilfe, Geduld und ihr Verständnis bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Mutter, Gitta Seehase, für ihre unermüdliche und vielseitige Unterstützung, mit der sie mir in allen Phasen dieser Arbeit eine große Hilfe war.

KURZFASSUNG

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen integrierte Heizstrukturen in Leiterplatten hergestellt und in ihrer Anwendbarkeit evaluiert werden. Damit soll ein Beitrag zur fortschreitenden 3D-Integration auf dem Gebiet von multifunktionalen Leiterplatten geleistet werden. Als Vorteil wird eine effizientere Übertragung der Wärmeenergie durch eine Heizstruktur auf ein elektronisches System (Leiterplatte / Baugruppe) gesehen, in das diese Struktur integriert wurde. Darüber hinaus könnten endogen beheizte Leiterplatten einen Mehrwert bezogen auf verfahrenstechnische Einsparungen und Unterstützungspotenziale gegenüber aktuellen exogenen Heizprozessen generieren. Als praktische Lösungsansätze werden die induktive Erwärmung von metallischen Suszeptorschichten sowie die Joulesche Erwärmung verschiedener resistiver Schichten verfolgt.

Bei der induktiven Erwärmung werden grundlegende Abhängigkeiten sowohl für Kupfer- bzw. Aluminium-Suszeptoren, bei ihrer Verwendung im elektromagnetischen Querfeld, als auch für Eisen-, Nickel- bzw. NiFe-Suszeptoren, bei ihrer Verwendung im elektromagnetischen Längsfeld, untersucht. Wichtige Faktoren, die die erreichbaren Temperaturwerte beeinflussen, sind die geometrischen Abmessungen der Suszeptorproben.

Für den Einsatz als resistive Heizschicht wurden verschiedene kohlenstoffhaltige Polymer-Verbundwerkstoffe (in Form von: Paste, Lack, Folie) sowie eine auf Kupferfolie abgeschiedene Nickel-Phosphor-Widerstandslegierung untersucht. Mit jedem genannten Material sind Heizschichten auf Leiterplattenmaterialien hergestellt und charakterisiert worden. Dabei wurde unter anderem die Integrierbarkeit der erforderlichen technologischen Prozesse (z. B. Drucken, Laminieren, Einbetten usw.) in einen Leiterplattenherstellungsprozess untersucht. Die hergestellten Heizsysteme sind auf ihre elektrische sowie thermische Stabilität unter Temperaturlast sowie bei klimatischen Belastungen analysiert worden. Infolge von Prozess- und Temperatureinflüssen zeigten sich bei den leitfähigen Polymeren größere Abhängigkeiten verschiedener Schichtparameter (z.B. Schichtwiderstand, Schichtdicke, Temperaturkoeffizient, ...) als bei der Widerstandslegierung.

Abschließend werden Beispiele für die praktische Verwendung integrierter Heizschichten auf Leiterplattendemonstratoren beschrieben. Hierfür wurden spezielle Testplatinen mit Heizstrukturen ausgerüstet, um an diesen verschiedene thermische Prozesse abzubilden. Bei den Prozessbeispielen handelt es sich um zwei endogene Lötprozesse (resistiv und induktiv), eine thermisch unterstützte Scherfestigkeitsprüfung sowie ein Beispiel für eine zyklische Temperaturbelastung mit integrierten Heizschichten.

ABSTRACT

Within the scope of the present work, integrated heating structures in circuit boards are to be manufactured and their applicability evaluated. With this a contribution to the ongoing trend of 3D integration in the field of multifunctional printed circuit boards shall be made. As an advantage, a more efficient transfer of heat energy from a heating structure towards an electronic system (PCB/assembly), into which this structure was integrated, is seen. Furthermore, endogenously heated printed circuit boards could generate added value with regard to process engineering savings and support potentials compared to current exogenous heating processes. For the practical solution the inductive heating of metallic susceptor layers as well as the Joule heating of different resistive layers will be pursued.

With induction heating, fundamental dependencies for copper and aluminium susceptors, when used in the electromagnetic transverse field, and for iron, nickel and NiFe susceptors, when used in the longitudinal electromagnetic field, are investigated. Important factors that influence the achievable temperature values are the geometrical dimensions of the susceptor samples.

For use as a resistive heating layer, various carbon-containing polymer composites (in form of: paste, lacquer, foil) as well as a nickel-phosphorus resistance alloy, deposited on a copper foil, were investigated. With each of these materials, heating layers on printed circuit board materials were produced and characterized. Among other things, the integratability of the required technological processes (e.g., printing, laminating, embedding, etc.) in a circuit board manufacturing process has been investigated. The manufactured heating systems have been analyzed for their electrical and thermal stability under temperature load and climatic loads. As a result of process and temperature effects, the conductive polymers showed greater dependencies of different layer parameters (e.g., sheet resistance, layer thickness, temperature coefficient, etc.) than the resistance alloy.

Finally, examples of the practical use of integrated heating layers on printed circuit board demonstrators will be described. For this purpose, special test boards were equipped with heating structures to simulate different thermal processes. The process examples are two endogenous soldering processes (resistive and inductive), a thermally assisted shear strength test and an example of a cyclic temperature load with integrated heating layers.

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	XV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XVI
VERWENDETE SYMBOLE.....	XIX
 1. EINLEITUNG	 1
1.1 EINSTIEG IN DAS THEMENGEBIET	1
1.2 MOTIVATION UND FRAGESTELLUNG.....	3
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	7
 2. GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK	 9
2.1 GRUNDLAGEN DER LEITERPLATTENTECHNOLOGIE	9
2.1.1 <i>Aufbau und Arten von Leiterplatten</i>	10
2.1.2 <i>Materialien für Leiterplatten</i>	12
2.1.2.1 Epoxidharz-Glasfaser-Kernmaterial und Prepregs.....	14
2.1.2.2 Leitermaterialien, Kupferfolien und Oberflächen-Metallisierungen.....	19
2.1.3 <i>Fertigungsverfahren bei der Produktion von Leiterplatten</i>	26
2.1.3.1 Ein- und doppelseitige Leiterplatten	27
2.1.3.2 Mehrlagige Leiterplatten	29
2.2 FERTIGUNG ELEKTRONISCHER BAUGRUPPEN	32
2.2.1 <i>Arten von Baugruppen</i>	33
2.2.2 <i>Weichlöttechnologie</i>	34
2.2.2.1 Lotwerkstoffe.....	35
2.2.2.2 Applikationsverfahren von Pasten und Gemischen.....	37
2.2.2.3 Einteilung und Arten von Weichlötverfahren.....	42
2.2.3 <i>Zuverlässigkeit von Elektronischen Baugruppen</i>	46
2.3 ENERGIE, WÄRMEENERGIE UND WÄRMETRANSPORT	52
2.3.1 <i>Wärme und Temperatur</i>	53
2.3.2 <i>Arten der Wärmeübertragung</i>	54
 3. ERWÄRMUNG VON LEITERPLATTEN UND FÜGESTELLEN	 59
3.1 ERWÄRMUNGSVERFAHREN NACH DEM MECHANISMUS DER ENERGIEUMWANDLUNG	59
3.1.1 <i>Elektrische Energie in Wärme</i>	59
3.1.2 <i>Strahlungsenergie in Wärme</i>	67
3.1.3 <i>Mechanische Energie in Wärme</i>	69
3.1.4 <i>Chemische Energie in Wärme</i>	71

3.2	THERMISCHES VERHALTEN VON LEITERPLATTEN MIT INTEGRIERTEN HEIZSTRUKTUREN	75
3.2.1	<i>Wärmewiderstand und Thermisches Ersatzschaltbild</i>	76
3.2.2	<i>Energiebedarf zum Erwärmen von Leiterplatte und Fügestellen</i>	87
3.3	POTENTIAL BEI DER VERWENDUNG VON ENDOGENER ERWÄRMUNG	90
3.4	ANFORDERUNGEN ZUR ERWÄRMUNG MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN	95
4.	INDUKTIVES HEIZEN MIT INTEGRIERTEN SUSCEPTORSCHICHTEN	97
4.1	GRUNDLAGEN ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG	98
4.2	STAND DER TECHNIK ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON LEITERPLATTEN UND FÜGESTELLEN.....	103
4.3	VERSUCHSEINRICHTUNG ZUM HEIZEN VON LEITERPLATTEN IM MAGNETISCHEN FELD	105
4.3.1	<i>Kenndaten zum Erwärmen im transversalen Magnetfeld</i>	107
4.3.2	<i>Kenndaten zum Erwärmen im longitudinalen Magnetfeld</i>	110
4.4	MATERIALAUSWAHL FÜR SUSCEPTOREN.....	114
4.4.1	<i>Materialien für die Quersfelderwärmung</i>	114
4.4.2	<i>Materialien für die Längsfelderwärmung</i>	117
4.5	AUFBAU VON PROBEN UND GEOMETRISCHE EINFLÜSSE VON SUSCEPTOREN IM INDUKTORFELD.....	119
4.5.1	<i>Suszeptorproben im Magnetfeld einer Flachspule (Quersfeld)</i>	119
4.5.2	<i>Suszeptorproben im Magnetfeld einer Zylinderspule (Längsfeld)</i>	122
4.6	EINFLUSS DES MAGNETISCHEN FELDES AUF BAUGRUPPEN.....	125
5.	RESISTIVES HEIZEN MIT INTEGRIERTEN SCHICHTEN	128
5.1	PRINZIP UND PARAMETER FÜR DIE ERWÄRMUNG VON RESISTIVEN SCHICHTEN	128
5.2	MATERIALAUSWAHL	131
5.2.1	<i>Metallische Schichten und Mäanderstrukturen</i>	131
5.2.2	<i>Widerstandsfolien</i>	132
5.2.3	<i>Gemische mit Carbon-Füllstoffen</i>	137
5.3	APPLIKATIONSMÖGLICHKEITEN DER AUSGEWÄHLTEN HEIZMATERIALIEN	144
5.3.1	<i>Applikation mittels Streichen, Sprühen und Schleudern</i>	144
5.3.2	<i>Heizschicht Applikation mittels Drucktechnologien</i>	149
5.3.2.1	<i>Siebdruck von Carbon-Gemischen</i>	150
5.3.2.2	<i>Schablonendruck von Carbon-Gemischen</i>	155
5.3.3	<i>Laminieren der Resistiven Folien</i>	156
5.4	WEITERVERARBEITUNG DER HEIZSCHICHTEN MITTELS LEITERPLATTENTECHNOLOGIEN	160
5.4.1	<i>Strukturierung der Heizschichten mittels Laserabtrag bzw. Ätzen</i>	161
5.4.2	<i>Integration der gedruckten Carbon-Schichten ins Basismaterial</i>	168
5.4.3	<i>Kontaktierungsmöglichkeiten</i>	172
5.4.4	<i>Haftfestigkeit der Heizschichten auf Leiterplatten-Substraten</i>	176
5.5	THERMISCHE UND ELEKTRISCHE ABHÄNGIGKEITEN DER HEIZSCHICHTPARAMETER	182
6.	ANWENDUNGSBEISPIELE UND BEWERTUNG DER QUALITÄT	197

6.1	BEWERTUNG DER QUALITÄT RESISTIVER HEIZSCHICHTEN	197
6.1.1	<i>Langzeitstabilität bei thermischer Belastung der Heizschichten</i>	197
6.1.2	<i>Stabilität bei klimatischer Belastung auf Heizschichten</i>	202
6.2	ANWENDUNGEN FÜR INTEGRIERTE HEIZSCHICHTEN	206
6.2.1	<i>Demonstratoren zum Endogenen Löten</i>	206
6.2.1.1	Löten mit induktiver Erwärmung	206
6.2.1.2	Löten mit resistiver Erwärmung	210
6.2.2	<i>Demonstratoren für Zuverlässigkeitscoupons</i>	214
6.2.2.1	Scherkraftmessungen unter Temperatureinfluss	215
6.2.2.2	Aktive thermische Alterung	218
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	222
	ANHANG	229
	LITERATURVERZEICHNIS	251
	VERÖFFENTLICHUNGSLISTE	275
	EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG.....	279

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1-1: BEISPIELE FÜR LEITERPLATTEN: EIN PLATINE [1] VON CA. 1950 (LINKS) UND PLATINEN VERBAUT IN EINEM SMARTPHONE VON 2012 (RECHTS)	1
ABBILDUNG 1-2: REALISIERUNG EINES MINIATURISIERTEN KAMERAMODULS MITTELS 3D-INTEGRATION [4]	2
ABBILDUNG 1-3: SKIZZE FÜR VERSCHIEDENE ANWENDUNGEN IN EINER MULTIFUNKTIONALEN LEITERPLATTE [5]	2
ABBILDUNG 1-4: QUALITATIVE GEGENÜBERSTELLUNG EXEMPLARISCHER AUSWIRKUNGEN VON ERWÄRMUNGSPROZESSEN AUF LEITERPLATTEN UND BAUGRUPPEN	5
ABBILDUNG 1-5: PRINZIP EINER INTEGRIERTEN HEIZSCHICHT IN LEITERPLATTEN	6
ABBILDUNG 2-1: GENERELLER AUFBAU EINER KLASSISCHEN LEITERPLATTE SOWIE FUNKTIONEN UND ANFORDERUNGEN AN DIE EINZELNEN KOMPONENTEN (NACH [30])	10
ABBILDUNG 2-2: EXEMPLARISCHE GEWICHTSVERLUSTE (TGA) VERSCHIEDENER BASISMATERIALTYPEN MIT EINER LAMINATDICKE VON 1,5 MM (NACH [39])	13
ABBILDUNG 2-3: QUERSCHLIFF VON ZWEI 1,5 MM DICKEN FR-4-LAGEN (MIT KUPFER) WELCHE MIT EINEM 106ER PREPREG VERPRESST WURDEN (GLASFASER-VERGRÖßERUNG AUS [34]).....	15
ABBILDUNG 2-4: REAKTIONSMECHANISMUS DER EPOXIDHARZSYNTHSE MITTELS BISPHENOL A (NACH [47])	16
ABBILDUNG 2-5: ALLGEMEINES TTT-DIAGRAMM MIT DEN PHASEN BEI DER HÄRTUNG EINES EPOXID-HARZSYSTEMS (NACH [48]) ..	17
ABBILDUNG 2-6: MATERIALIEN UND VERFAHRENSCHRITTE DER BASISMATERIALHERSTELLUNG [34]	18
ABBILDUNG 2-7: TEMPERATUREINFLUSS AUF DEN ELEKTRISCHEN WIDERSTAND INFOLGE VON KOLLISIONEN IM KRISTALLGITTER	22
ABBILDUNG 2-8: WIDERSTANDSVERRRINGERUNG BEI STEIGENDER TEMPERATUR DURCH LADUNGSTRÄGERFREISETZUNG	22
ABBILDUNG 2-9: REM-AUFNAHMEN VERSCHIEDENER TREATMENTSCHICHTEN MIT QUADRATISCHER MITTLERER RAUTIEFE (RMS) [70]	24
ABBILDUNG 2-10: DARSTELLUNG EINES KONTAKTES ZWISCHEN EINER RAUEN UND EINER IDEAL GLATTEN KONTAKTFLÄCHE (NACH [15])	24
ABBILDUNG 2-11: SCHEMATISCHER ABLAUF DER FERTIGUNGSSCHRITTE EINER DOPPELSEITIGEN LEITERPLATTE	28
ABBILDUNG 2-12: WEITERE PROZESSCHRITTE ZUR FERTIGUNG EINER MEHRLAGEN LEITERPLATTE	30
ABBILDUNG 2-13: TYPISCHER PRESSPAKETAUFBau (NACH [78])	30
ABBILDUNG 2-14: TYPISCHE TEMPERATUR- UND DRUCK-PARAMETER EINES HYDRAULISCHEN LAMINIERPROZESSES (NACH [76])	32
ABBILDUNG 2-15 BAUGRUPPENARTEN ANHAND IHRER BESTÜCKUNGSTECHNOLOGIE (NACH [86]) – ERWEITERT UM „EINGEBETTETE KOMPONENTEN“)	33
ABBILDUNG 2-16 BINÄRES PHASENDIAGRAMM DES SYSTEMS BISMUTH-ZINN [91]	36
ABBILDUNG 2-17: PRINZIP DER DISPENSTECHNIK (LINKS, NACH [96]) UND BEISPIEL FÜR EINEN MANUELLEN DISPENSER (RECHTS OBEN) UND EINE AUTOMATISCHE DISPENSEINRICHTUNG EINES BESTÜCKUNGSAUTOMATEN (RECHTS UNTEN)	38
ABBILDUNG 2-18: BEISPIELE FÜR DISPENSARBEITEN: DOSIERUNG VON SILBERLEITKLEBER (LINKS); INTEGRIERTE HEIZSTRUKTUR AUS AG-LEITPASTE IN 3D-DRUCKKÖRPER [97] (RECHTS)	38
ABBILDUNG 2-19: PRINZIP DER APPLIKATION MITTELS SIEBDRUCK (NACH [52])	39
ABBILDUNG 2-20: SIEBGeweBE; WICHTIGE GewEBEPARAMETER (LINKS); BEISPIELE FÜR EIN EDELSTAHLsIEB (RECHTS OBEN) UND EIN POLYESTERSIEB (RECHTS UNTEN)	39

ABBILDUNG 2-21: BEISPIEL FÜR SIEBDRUCK: SIEBDRUCK VON FUNKTIONALISIERTEN TINTEN (LINKS); SIEBGEDRUCKTER KONSTANTAN-HEIZER AUS METALLPASTE [99] (RECHTS)	40
ABBILDUNG 2-22: PRINZIP DER APPLIKATION MITTELS SCHABLONENDRUCK (NACH [100])	41
ABBILDUNG 2-23: METALLSCHABLONE; SCHABLONENÖFFNUNGSPARAMETER (LINKS)(NACH [93]); BEISPIEL FÜR EINE LASERGESCHNITTENE LOTPASTENSCHABLONE (RECHTS)	42
ABBILDUNG 2-24: ÜBERSICHT ÜBER DIE REFLOWLÖTVERFAHREN (NACH [96])	43
ABBILDUNG 2-25: PRINZIPDARSTELLUNG FÜR DEN ZEITLICHEN UND ÖRTLICHEN PROZESSEINSATZ EINZELNER INTEGRIERTER HEIZSCHICHTEN	43
ABBILDUNG 2-26: VERANSCHAULICHUNG DES ERLAUTBEN PROZESSFENSTERS BEI EINEM TYPISCHEN TEMPERATURPROFIL FÜR DAS REFLOWLÖTEN (NACH [101]).....	44
ABBILDUNG 2-27: PRINZIP DER THERMO-MECHANISCHEN ERMÜDUNG VON LÖTVERBINDUNGEN INFOLGE UNTERSCHIEDLICHER AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN	47
ABBILDUNG 2-28: ÄNDERUNG DER WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN BEI DER THERMISCHEN AUSLAGERUNG MIT VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN [89], [113]	48
ABBILDUNG 2-29: FESTIGKEIT EINES METALLISCHES WERKSTOFFES IN ABHÄNGIGKEIT DER HOMOLOGEN TEMPERATUR (LINKS); SCHERFESTIGKEITEN VERSCHIEDENER LOTLEGIERUNGEN BEI 20 °C UND BEI 100 °C (NACH DATEN AUS [96]) (RECHTS)	50
ABBILDUNG 2-30: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BELASTUNG VON LÖTSTELLEN AUF SCHERUNG AN EINEM SMD-ZWEIPOLER ..	50
ABBILDUNG 2-31: VERÄNDERUNG DES T _G VON ZWEI VIERLAGIGEN FR-4-LAMINATEN INFOLGE DER WASSERAUFNAHME BEI DER LAGERUNG (NACH DATEN AUS [119])	51
ABBILDUNG 2-32 ÜBERSICHT VERSCHIEDENER ENERGIEFORMEN MIT BEISPIEL [121]	52
ABBILDUNG 2-33: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMELEITUNG DURCH VERSCHIEDENE SCHICHTEN (NACH [125]).....	55
ABBILDUNG 2-34: EXEMPLARISCHE VERÄNDERUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR FÜR KUPFER (NACH DATEN AUS [128]) (LINKS) UND EIN EPOXID (NACH DATEN AUS [129]) (RECHTS)	55
ABBILDUNG 2-35: KONVEKTIVER WÄRMETRANSPORT AN EINER OBERFLÄCHE (NACH [108]).....	56
ABBILDUNG 2-36: WÄRMETRANSPORT DURCH STRAHLUNG ZWISCHEN KÖRPER UND UMGEBUNG (NACH [108]).....	57
ABBILDUNG 3-1: LEISTUNGSDICHTEN UND WIRKUNGSQUERSCHNITTE VON ELEKTROWÄRMEVERFAHREN (NACH [127])	61
ABBILDUNG 3-2: SELBST-LÖTENDE-VERBINDUNGSELEMENTE MIT NIEDRIG SCHMELZENDEM LOTVORRAT AUF TOP-SEITE UND HEIZWIDERSTÄNDEN AUF BOTTOM-SEITE (A), (B) & (C); SCHEMA DES WÄRMETRANSPORTES DURCH DIE PLATINE (E); THERMOGRAFIEAUFNAHME DER PLATINE BEIM HEIZEN (F); LÖTMODULE WELCHE SICH INDIVIDUELL FÜGEN UND TRENNEN KÖNNEN (G) [133]	62
ABBILDUNG 3-3: BEISPIELANWENDUNG MIT EINER STRUKTURIERTEN WIDERSTANDSFOLIE AUF LEITERPLATTE [137]	63
ABBILDUNG 3-4: BEISPIEL FÜR VERSCHIEDENE FLEXIBLE HEIZELEMENTE IN POLYESTER (LINKS); SILIKON (MITTE) UND POLYIMID (RECHTS)	64
ABBILDUNG 3-5: ABHÄNGIGKEIT DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT UND DER MECHANISCHEN FESTIGKEIT EINER SCHICHT VON DER KONZENTRATION DER LEITFÄHIGEN FÜLLSTOFFE (NACH [141])	65
ABBILDUNG 3-6: PATENTIERTE KONZEPTE FÜR HEIZSYSTEME INTEGRIERT IN LEITERPLATTE; LINKS: LOKALE HEIZER UNTERHALB DER BAUTEILANSCHLÜSSE (NACH [145]); RECHTS: BEHEIZBARER INTERPOSER FÜR REWORK-AUFGABEN (NACH [147])	66

ABBILDUNG 3-7: ULTRASCHALLLÖTEN AUF LEITERPLATTE AUS [95] OBEN LINKS: PRINZIPIELLER AUFBAU DES ULTRASCHALL- LÖTSYSTEMS; OBEN RECHTS: US-ERWÄRMUNG EINER LEITERPLATTE BEI 35 KHz NACH 114 S; UNTEN: TEMPERATURPROFILE BEIM LÖTEN, GEMESSEN AN VERSCHIEDENEN STELLEN AUF DER LEITERPLATTE	70
ABBILDUNG 3-8: PRINZIPIALKITZE EINES ENTWÄRMUNGSKONZEPTES AUF BASIS EINES SORPTIONSSPEICHERS [160]	71
ABBILDUNG 3-9: AUFHEIZCHARAKTERISTIK EINES 2512-SMD-CHIP-WIDERSTANDES MIT UND OHNE SORPTIONSSPEICHER (KIESELGEL) (LINKS); THERMOGRAFIEAUFNAHME VON BESCHICHTETEN UND UNBESCHICHTETEN TEST-WIDERSTÄNDEN WÄHREND DES BETRIEBES MIT EINER VERLUSTLEISTUNG VON 0,75 W PRO ELEMENT (RECHTS) [160]	72
ABBILDUNG 3-10: SKITZE EINER REAKTIVEN FOLIE UND DEREN REAKTIONSABLAUF [165]	72
ABBILDUNG 3-11: PRINZIPIALBLAUF FÜR EINEN UNTERSTÜTZTEN LÖTPROZESS MIT EINEM REAKTIVEN PASTENDEPOT AUF LEITERPLATTE (LINKS) [24]; BEISPIEL ZUM REAKTIV UNTERSTÜTZTEN LÖTEN AN EINEM BGA (RECHTS) [166]	73
ABBILDUNG 3-12: PREFORMS AUS REAKTIVEM MATERIAL (LINKS); PRINZIPIALBLAUF FÜR EINEN UNTERSTÜTZTEN LÖTPROZESS MIT REAKTIVEN PREFORMS AUF LEITERPLATTE (RECHTS) [24]	74
ABBILDUNG 3-13: MIT REAKTIVEM MATERIAL GEFÜLLTE HÜLSEN (LINKS); PRINZIPIALBLAUF FÜR EINEN UNTERSTÜTZTEN LÖTPROZESS MIT EINGEHÜLSTEM REAKTIVEM MATERIAL AUF LEITERPLATTE (RECHTS) [24]	74
ABBILDUNG 3-14: BEISPIEL FÜR THERMISCHES ERSATZSCHALTBILD EINES LEITERPLATTEN-BASIS MATERIALS MIT VOLLFLÄCHIGER HEIZSCHICHT AUF RÜCKSEITE	77
ABBILDUNG 3-15: STATISCHES TEMPERATURVERHALTEN AN HEIZSCHICHT (UNTERSEITE) UND KUPFERFLÄCHE (OBERSEITE) VON FR-4- LAMINATEN VERSCHIEDENER DICKEN.....	78
ABBILDUNG 3-16: TEMPERATUREN AUF DER KUPFERSEITE DES STATISCHEN LEITERPLATTENMODELLS BEI DER VARIATION DES KONVEKTIVEN WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN	79
ABBILDUNG 3-17: THERMISCHES ERSATZSCHALTBILD FÜR EINE ENDOGEN ERWÄRMTE LEITERPLATTE NACH DEM CAUER-MODELL	80
ABBILDUNG 3-18: TEMPERATURENTWICKLUNG AN DER OBERSEITE DES MODELLIERTEN LEITERPLATTENAUFBAUS BEI UNTERSCHIEDLICHEN VERLUSTLEISTUNGEN IN DER HEIZSCHICHT	81
ABBILDUNG 3-19: TEMPERATURUNTERSCHIEDE AN OBER- UND UNTERSEITE EINER LEITERPLATTE IN ABHÄNGIGKEIT DER EINBETTIEFE DER HEIZSCHICHT (NACH 360 S; 60 W; 100 CM ²)	82
ABBILDUNG 3-20: AUFHEIZKURVEN AUF DER OBERSEITE BEIM BETRIEB MIT EINGEBETTETER HEIZSCHICHT FÜR VERSCHIEDENE KUPFERLAGENSTÄRKEN (LINKS) UND UNTERSCHIEDLICHE EMISSIONSKOEFFIZIENTEN DES KUPFERS (RECHTS)	82
ABBILDUNG 3-21: FEM-MODELL EINER ENDOGEN ERWÄRMTE LEITERPLATTE; RECHENNETZ (OBEN LINKS); TEMPERATURVERTEILUNGEN TOP- UND BOTTOM-SEITE (OBEN RECHTS; UNTEN RECHTS); TEMPERATURVERTEILUNG IM INNEREN AUSSCHNITT VOM QUERSCHNITT DES RANDES IM ABSTAND VON 50 MM VON DER ECKE	84
ABBILDUNG 3-22: TEMPERATURVERTEILUNG BEI ERWÄRMUNG (60 W; 360 S) MIT FR-4 (OBEN) UND KUPFER (UNTEN) AUF DEN AUßENLAGEN (UNTEN)	85
ABBILDUNG 3-23: SIMULIERTE TEMPERATURVERTEILUNG AN DER MITTLEREN QUERSCHNITTSEBENE DES MODELLS FÜR VERSCHIEDENE HEIZSCHICHTABSTÄNDE ZUM RAND (0 MM; 5 MM; 10 MM) FÜR PLATINEN MIT REINEN FR-4-AUßENLAGEN (OBEN) UND BEIDSEITIGER KUPFERAUFLEGE (UNTEN)	86
ABBILDUNG 3-24: DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNGEN ENTLANG DER OBERFLÄCHE DER HALBEN MITTELACHSE DES MODELLS FÜR VERSCHIEDENE ABSTÄNDE DER HEIZSCHICHT AUF FR-4 UND KUPFER	87

ABBILDUNG 3-25: MODELLIERTE BAUTEILE FÜR NUMERISCHE BESTIMMUNG DER NOTWENDIGEN LEISTUNGSDICHTE ZUM HEIZEN BIS AUF CA. 217 °C.....	88
ABBILDUNG 3-26: SIMULIERTE TEMPERATURANSTIEGE IN DEN LOTDEPOTS VERSCHIEDENER BAUFORMEN (LINKS) UND DIE TEMPERATURVERTEILUNG IN DEN BAUTEILEN NACH 360 S BEI ENDOGENER ERWÄRMUNG MIT 1 W/cm ² (RECHTS)	89
ABBILDUNG 3-27: LEISTUNGSVERBRAUCH EINER INDUSTRIELLEN ZWANGSKONVEKTIONSLÖTMASCHINE WÄHREND VERSCHIEDENER BETRIEBSPHASEN (OBEN); ENERGIEVERBRAUCH ÜBER DIE MESSDAUER (UNTEN) (NACH DATEN AUS [176])	90
ABBILDUNG 3-28: KONZEPTSKIZZE EINES VERTIKALOFENS FÜR DAS REFLOWLÖTEN AN ELEKTRISCH BEHEIZTEN LEITERPLATTEN (NACH [177])	92
ABBILDUNG 3-29: EINSARPOTENTIALS BEI DER SUBSTITUTION EINES KONVEKTIVEN STANDARD REFLOWLÖTPROZESSES DURCH EINEN LÖTPROZESS MIT ENDOGEN BEHEIZTEN LEITERPLATTEN (NACH DATEN AUS [178]).....	92
ABBILDUNG 3-30: BEISPIEL FÜR DIE ERHÖHUNG DER RESTSCHERFESTIGKEIT DURCH ERHALTUNGSLÖTEN AN THERMISCH GEALTERTEN ZWEIFOLER-LÖTVERBINDUNGEN (NACH DATEN AUS [180]).....	94
ABBILDUNG 4-1: KONZEPT ZUR ENDOGENEN HEIZUNG VON LEITERPLATTEN MITTELS INDUKTIONSWÄRME	97
ABBILDUNG 4-2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON WIRBELSTRÖMEN IM MATERIAL (LINKS) UND VON LOKALEN WIRBELSTRÖMEN IN DER NÄHE VON BEWEGTEN DOMÄNEN (RECHTS) (NACH [189])	100
ABBILDUNG 4-3: VERLÄUFE DER EINDRINGTIEFEN FÜR VERSCHIEDENE METALLE IN ABHÄNGIGKEIT DER FREQUENZ DES ÄUßEREN MAGNETFELDES (FÜR T = 20 °C)	102
ABBILDUNG 4-4: SELEKTIVE INDUKTIONSLÖTEINHEIT: QUERSCHNITTSSHEMA (LINKS) UND BAULICHE AUSFÜHRUNG (RECHTS) [197]	103
ABBILDUNG 4-5: PRINZIP ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON FÜGESTELLEN MIT FEST VERBAUTEN PLANARINDUKTOREN (LINKS, NACH [200]) UND MIT EINGEBETTETEN FELD-EINKOPPELNDEN STRUKTUREN (RECHTS, NACH [201])	104
ABBILDUNG 4-6: KONZEPTE ZUM AUFBAU INDUKTIV ERWÄRMBARER LOTPASTEN MIT MEHRSCICHTIGEN LOTPARTIKELN (LINKS) UND EINER BEIMISCHUNG ZU LOTKUGELN (RECHTS) (NACH [204]).....	105
ABBILDUNG 4-7: PRINZIPIELLER AUFBAU EINER INDUKTIVEN ERWÄRMUNGSEINRICHTUNG (NACH [208])	106
ABBILDUNG 4-8: SKIZZE DER MAGNETFELDGEOMETRIE EINER FLACHSPULE	107
ABBILDUNG 4-9: AUFBAU VON INDUKTOR- UND MESSBEREICH DES QUERFELD-INDUKTIONSSYSTEMS; QUERSCHNITT-ANSICHT DER FLACHSPULE MIT FERRITKERN (OBEN LINKS); DRAUFSICHT MIT EISENRING ALS SEKUNDÄRLAST RECHTS); 2D-SIMULATIONSMODELL (UNTEN LINKS).....	108
ABBILDUNG 4-10: SIMULIERTE MAGNETISCHE FELDSTÄRKE UND FELDVEKTOREN DER HALBEN FLACHSPULE OHNE (LINKS) UND MIT (RECHTS) SEKUNDÄRLAST BEI EINEM SPULENSTROM VON 28 A	109
ABBILDUNG 4-11: AUSRICHTUNG VON EISENSPÄNEN IM MAGNETISCHEN FELD EINES FLACHSPULENINDUKTORS	109
ABBILDUNG 4-12: VERGLEICH ZWISCHEN PRAKTISCHER MESSUNG UND NUMERISCHER SIMULATION ZUR ERWÄRMUNG VON KUPFERSUSZEPTOREN (20 MM X 20 MM) IM QUERFELD EINER FLACHSPULE	110
ABBILDUNG 4-13: SKIZZE DER MAGNETFELDGEOMETRIE EINER ZYLINDERSPULE	111
ABBILDUNG 4-14: ZYLINDERSPULENINDUKTOR MIT SUSZEPTORPROBE (LINKS) UND DESSEN 2D-FEM-MODELL (RECHTS) ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG IM MAGNETISCHEN LÄNGSFELD	111
ABBILDUNG 4-15: SIMULIERTE MAGNETISCHE FELDSTÄRKE UND FELDVEKTOREN DER HIER VERWENDETEN ZYLINDERSPULE BEI EINEM SPULENSTROM VON 48 A.....	112

ABBILDUNG 4-16: VERGLEICH ZWISCHEN PRAKTISCHER MESSUNG UND NUMERISCHER SIMULATION ZUR ERWÄRMUNG VON BLECHEN (15 MM x 15 MM) IM LÄNGSFELD EINER ZYLINDERSPULE	113
ABBILDUNG 4-17: MESSUNG DER EIGENERWÄRMUNG/STÖREINKOPPLUNG MIT VERSCHIEDENEN THERMOELEMENTEN IM LÄNGSFELDINDUKTOR.....	114
ABBILDUNG 4-18: EINFLUSS AUF DIE TEMPERATUR BEI NUMERISCHER VARIATION DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT EINES SUSZEPTORS (20 MM x 20 MM x 0,1 MM) IM MAGNETISCHEN QUERFELD EINER FLACHSPULE	115
ABBILDUNG 4-19: ERWÄRMUNG VON ALUMINIUMSUSZEPTOREN (20 MM x 20 MM) UNTERSCHIEDLICHER DICKE IM QUERFELD EINER FLACHSPULE	116
ABBILDUNG 4-20: SIMULATION (LINKS) UND IR-AUFNAHME DER TEMPERATURVERTEILUNG (RECHTS) EINES RASTERS EINZELNER EISENBLECHE IM INDUKTIONSFELD EINER FLACHSPULE	117
ABBILDUNG 4-21: BERECHNETE WIRBELSTROMERWÄRMUNG PARA- UND DIAMAGNETISCHER SUSZEPTOREN (15 x 15 MM) UNTERSCHIEDLICHER DICKE IM MAGNETISCHEN LÄNGSFELD (NACH 120 S).....	117
ABBILDUNG 4-22: EINFLUSS DER SUSZEPTORDICKE UND DER SUSZEPTORBREITE EINES QUADRATISCHEN ZUSCHNITTES AUF DIE ERREICHBAREN HÖCHSTTEMPERATUREN IM SUSZEPTOR NACH 150 S IM FELD EINER FLACHSPULE	120
ABBILDUNG 4-23: ERWÄRMUNG VON BASISMATERIAL-PROBEN MIT AUFLAMINIERTEN KUPFERSUSZEPTOREN (20 MM x 20 MM) UNTERSCHIEDLICHER DICKE AUF DER RÜCKSEITE	121
ABBILDUNG 4-24: TEMPERATURUNTERSCHIED ZWISCHEN SUSZEPTOR UND PROBENOBERVERSEITE IN ABHÄNGIGKEIT DER EINBETTtiefe IM FR-4 (D = 1,55 MM) (LINKS); TEMPERATURVERTEILUNG AUF PROBENOBERVERSEITE IN ABHÄNGIGKEIT DER EINBETTtiefe EINES SUSZEPTORS (20 MM x 20 MM x 0,1 MM) (RECHTS) [SIMULIERTE WERTE NACH 50 S IM QUERFELD]	122
ABBILDUNG 4-25: NUMERISCH BERECHNETE VERLÄUFE SOWIE EXPERIMENTELLE EINZELMESSWERTE FÜR DIE ERREICHTE SUSZEPTORTEMPERATUR NACH 60 S IM LÄNGSFELD IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SUSZEPTORSTÄRKE (KANTENLÄNGEN: 15 MM x 15 MM).....	123
ABBILDUNG 4-26: GEMESSENE TEMPERATURVERLÄUFE IN DER MITTE VERSCHIEDENER NI-SUSZEPTOREN MIT UNTERSCHIEDLICHER SCHICHTDICKE	124
ABBILDUNG 4-27: EINFLUSS AUF DIE MAXIMALE SUSZEPTORTEMPERATUR (NACH 120 S) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KANTENLÄNGE QUADRATISCHER SUSZEPTOREN (LINKS) UND IN ABHÄNGIGKEIT VON DER POSITION DER SUSZEPTOREN IM INDUKTOR (RECHTS) – SIMULIERTE WERTE	124
ABBILDUNG 4-28: SIMULIERTE TEMPERATURVERTEILUNG (NACH 120 S) AUF DER OBERSEITE EINER FR-4 PLATINE MIT RÜCKSEITIG BEFESTIGTEN SUSZEPTOR (LINKS); ANLASSFARBEN AUF EINEM STAHL-SUSZEPTOR NACH DER ERWÄRMUNG IM LÄNGSFELD (RECHTS).....	125
ABBILDUNG 4-29: BEISPIELE VERSCHIEDENER LEAD-FRAME GEOMETRIEN IN INTEGRIERTEN SCHALTKREISEN; SO-8 (LINKS); SO-14 (MITTE); QFN (RECHTS)	126
ABBILDUNG 4-30: EIGENERWÄRMUNG IM QUERFELD AN FERROMAGNETISCHEN ANSCHLÜSSEN EINES DIP-14 IC's	127
ABBILDUNG 5-1: SIMULIERTE STROMDICHTVERTEILUNG IN EINER HOMOGENEN WIDERSTANDSSCHICHT IN ABHÄNGIGKEIT DER ELEKTRODengeometrie; SYMMETRISCHE ELEKTRODEN (LINKS) UND UNSYMMETRISCHE ELEKTRODEN (RECHTS).....	128
ABBILDUNG 5-2: SCHICHTWIDERSTÄNDE IN ABHÄNGIGKEIT DER ELEKTRODENANORDNUNG BEIM VOLLFLÄCHIGEN HEIZEN EINER DOPPEL-EURO LEITERPLATTE MIT 2 W/cm ² UND 60 V DC	129
ABBILDUNG 5-3: SEGMENTIERUNG EINER HEIZSCHICHT ZUR ANPASSUNG DES SCHICHTWIDERSTANDES	129

ABBILDUNG 5-4: ERFORDERLICHE SCHICHTWIDERSTÄNDE FÜR DAS ERREICHEN EINER VERLUSTLEISTUNG VON 2 W/cm^2 (MIT 60 V VERSORGUNGSSPANNUNG) IN ABHÄNGIGKEIT DER SEGMENTLÄNGE L ; FÜR EINE EINZELNE HEIZSCHICHT BZW. EIN SEGMENT (LINKS) UND FÜR EINE 4-FACH-SEGMENTIERTE HEIZSCHICHT (RECHTS)	130
ABBILDUNG 5-5 PRINZIPIELLER AUFBAU VON FLÄCHENHEIZELEMENTEN: A) VOLLFLÄCHIGER HEIZER; B) MÄANDERFÖRMIGER HEIZER [220]	131
ABBILDUNG 5-6: CARBON/POLYIMID-FOLIE: SCHEMATISCHER AUFBAU (LINKS) UND MIKROSKOPIE EINES QUERSCHLIFFS (RECHTS).....	133
ABBILDUNG 5-7: NiP/KUPFER-FOLIE: SCHEMATISCHER AUFBAU (LINKS); MIKROSKOPIE EINES QUERSCHLIFFS EINER LAMINIERTEN FOLIE (MITTE) UND EINER FREIGELEGTE NiP-SCHICHT (RECHTS)	134
ABBILDUNG 5-8: EINFLUSS DES PHOSPHORGEHALTES AUF DIE RESISTIVITÄT VON NICKEL-PHOSPHOR (NACH [231]).....	135
ABBILDUNG 5-9: REM-AUFNAHMEN VON QUERSCHLIFFEN MIT LAMINierter NICKEL-PHOSPHOR-SCHICHT; AM ÜBERGANG ZU KUPFER (LINKS); VOLLSTÄNDIG FREIGEÄTZTE SCHICHT (RECHTS)	135
ABBILDUNG 5-10: REM-AUFNAHME EINER NICKEL-PHOSPHOR-BESCHICHTUNG AUF DER TREATMENTSEITE EINER KUPFERFOLIE; 1.000-FACHE VERGRÖßERUNG (LINKS) UND 10.000-FACHE VERGRÖßERUNG (RECHTS)	136
ABBILDUNG 5-11: SCHEMATISCHER AUFBAU EINES CARBON-LACKGEMISCHES UND EINER CARBON-SCHICHT (AUSGEHÄRTET)	138
ABBILDUNG 5-12: PARTIKELGRÖßENBESTIMMUNG AN CP-3 MITTELS LICHT- UND RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE	139
ABBILDUNG 5-13: GEMESSENER VOLUMEN- UND GEWICHTSVERLUST WÄHREND DES TROCKNUNGSVORGANGES VON CP-3 (LINKS) UND BEISPIELAUFNAHMEN DER MIKROSKOPISCHEN VOLUMENVERMESSUNG NACH DER APPLIKATION UND AM ENDE DER TROCKNUNG (RECHTS)	141
ABBILDUNG 5-14: IN-SITU-WIDERSTANDSMESSUNG WÄHREND DES TROCKNUNGS- BZW. HÄRTUNGSPROZESS VON GEDRUCKTEN SCHICHTEN AUS CP-2 UND CP-3	141
ABBILDUNG 5-15: WIDERSTANDSVERLAUF VON CP-2-SCHICHT NACH DER OFENENTNAHME BEI RAUMKLIMA	142
ABBILDUNG 5-16: VEREINZELT BEOBACHTETE FEHLSTELLEN; KOCHERBILDUNG EINER DICKEREN CP-1-LACKSCHICHT (LINKS); RISSBILDUNG IN AUSGEHÄRTETER LACKSCHICHT EINE LOW-COST LEITLACKES (RECHTS)	143
ABBILDUNG 5-17: REM-AUFNAHME DER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT APPLIZIERTER CARBON-SCHICHTEN; EXEMPLARISCH FÜR CP-2 (LINKS) UND CP-3 (RECHTS).....	143
ABBILDUNG 5-18: CARBON-HEIZSCHICHT APPLIKATION MITTELS MANUELLEN AUFSTREICHENS VON CP-3; A) BEISPIELPROBE MIT ÜBERSTRICHENEN KONTAKTBÄNDERN; B) IR-AUFNAHME BEIM HEIZEN MIT $15,5 \text{ V}$ UND $0,34 \text{ A}$; IR-AUFNAHME BEIM HEIZEN MIT $25,7 \text{ V}$ UND $0,52 \text{ A}$	145
ABBILDUNG 5-19: CARBON-HEIZSCHICHT (CP-3) APPLIKATION MITTELS MANUELLEN AUFROLLENS; IR-AUFNAHMEN BEIM HEIZEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN VERLUSTLEISTUNGEN	146
ABBILDUNG 5-20: CARBON-HEIZSCHICHT (CP-2) APPLIKATION MIT MANUELLEM AUFROLLEN; IR-AUFNAHME ($\epsilon = 0,86$) BEIM HEIZEN MIT $19,7 \text{ V}$ UND $1,8 \text{ A}$ (LINKS); EXEMPLARISCHE LOKALE TEMPERATURPROFILE ÜBER BREITE BZW. LÄNGE DER HEIZSCHICHT (RECHTS)	146
ABBILDUNG 5-21: PRINZIPIELLER ABLAUF DER APPLIKATION MITTELS ROTATIONSBECHICHTUNG VON CARBON-GEMISCHEN (HIER CP-3) AUF FR-4-PROBEN; A) DOSIERTE LACKMENGE; B) ROTATION DER PROBE; C) PROBE MIT APPLIZIERTER SCHICHT	147

ABBILDUNG 5-22: SPIN-COATING VON CARBONLACK: A) GEMESSENE FLÄCHENWIDERSTÄNDE IN ABH. DER ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT ($T = 50$ s); B) IR-MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER CP-3-PROBE (6000 1/MIN ÜBER 50 s); C) IR-MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER CP-2-PROBE (6000 1/MIN ÜBER 50 s)	148
ABBILDUNG 5-23: AUFSPRÜHEN VON CP-3; A) GEMESSENE FLÄCHENWIDERSTÄNDE IN ABH. DER SPRÜHDURCHGÄNGE (MANUELL; KREUZGANG); B) IR-MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER CP-3-PROBE (1x SPRÜHDURCHGANG)	149
ABBILDUNG 5-24: TESTLAYOUT (233 MM x 160 MM) FÜR AUTOMATISIERTE DRUCKVERSUCHE VON CARBON-GEMISCHEN MIT SIEBEN UND SCHABLONEN; CAD-DATEN MIT SIEB/SCHABLONEN LAYER (GRÜN) (LINKS); BEDRUCKTE PLATINE MIT CARBON-HEIZSCHICHTEN (RECHTS)	150
ABBILDUNG 5-25: GEMESSENE SCHICHTDICKEN BEI DER APPLIKATION MITTELS MANUELLEM SIEBDRUCK VON CP-2 UND CP-3 MIT VERSCHIEDENEN SIEBEN	151
ABBILDUNG 5-26: OPTISCH VERMESSENES 3D-PROFIL VON MANUELL SIEBGEDRUCKTEN CARBON-GEMISCHEN	152
ABBILDUNG 5-27: EXEMPLARISCHE TEMPERATURVERTEILUNG BEIM HEIZEN VON MANUELL SIEBGEDRUCKTEN HEIZSCHICHTEN; IR-AUFNAHME UND T-PROFILE VON HEIZSCHICHT CP-2 (OBEN); IR-AUFNAHME (VON FR-4 RÜCKSEITE BETRACHTET) UND T-PROFILE VON HEIZSCHICHT CP-3 (UNTEN)	153
ABBILDUNG 5-28: GEMESSENE VISKOSITÄTEN VERSCHIEDENER CARBON-GEMISCHE BEI EINER SCHERRATE VON 10 1/s MIT EINER PLATTE/PLATTE-ANORDNUNG	154
ABBILDUNG 5-29: SIEBGeweBE MIT MATERIALRESTEN DER CARBON-GEMISCHE; INNERHALB DER DRAHTÜBERLAPPUNGEN (LINKS); INNERHALB DER MASCHEN (RECHTS)	155
ABBILDUNG 5-30: DRUCKFEHLER (RILLEN) BEIM SCHABLONENDRUCK DURCH SCHNELL TROCKNENDE MATERIALRESTE; ANGETROCKNETE MATERIALRESTE AUF METALLSCHABLONE (LINKS); LOKALE RILLEN IN DER HEIZSCHICHT (MITTE); LOKALE ÜBERHITZUNG DURCH HÖHEREN WIDERSTAND IN DRUCKRILLE (RECHTS)	156
ABBILDUNG 5-31: TEMPERATURPROFIL BEIM LAMINIEREN VON ZWEI 1,5 MM DICKEN FR-4-SUBSTRATEN (LINKS) UND SCHEMATISCHER AUFBAU DER PRESSEINRICHTUNG MIT BEZEICHNUNG DER TEMPERATURMESSPUNKTE (RECHTS)	157
ABBILDUNG 5-32: SCHEMA DES SCHICHTAUFBAUES FÜR DAS VERPRESSEN VON POLYIMID/CARBON-FOLIEN AUF FR-4-LAMINAT MIT DER CARBONSEITE NACH AUßEN (LINKS) ODER MIT DER CARBONSEITE AUF ELEKTRODEN DER INNENLAGE (RECHTS)	158
ABBILDUNG 5-33: VERLAUF DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES BEIM EINLAMINIEREN EINER C/PI-SCHICHT	158
ABBILDUNG 5-34: SCHEMA DES SCHICHTAUFBAUS FÜR DAS VERPRESSEN VON KUPFER/NiP-FOLIE AUF FR-4-LAMINAT	159
ABBILDUNG 5-35: WIDERSTANDSVERLAUF WÄHREND DES EINLAMINIERENS EINER NiP-HEIZSCHICHT	160
ABBILDUNG 5-36: GRUNDPRINZIP DER LASERSTRUKTURIERUNG EINER AUF LEITERPLATTENMATERIAL APPLIZIERTEN HEIZSCHICHT ..	162
ABBILDUNG 5-37: ABSORPTIONSVERHALTEN VON KUNSTSTOFF SOWIE TYPISCHEN ADDITIVEN (NACH [260]) (LINKS) UND VON VERSCHIEDENEN METALLEN (NACH [261] UND [262]) (RECHTS)	162
ABBILDUNG 5-38: BEISPIELE FÜR SCHLECHT ABGESTIMMTE LASERPARAMETER BEI DER STRUKTURIERUNG VON CP-5	163
ABBILDUNG 5-39: LASERSTRUKTURIERTE CP-1-SCHICHTEN; 3D-MESSUNGEN EINER GELASERTEN STRUKTUR AM ÜBERGANG ZU KUPFER (LINKS); SCHICHT AUF FR-4 BZW. KUPFER (RECHTS)	164
ABBILDUNG 5-40: BEISPIELVERSUCH ZUM LASERTRIMMEN VERSCHIEDENER HEIZSCHICHTMATERIALIEN MIT TYPISCHEN TRIMM-STRUKTUREN; AUFNAHME STRUKTURIERTER CP-1-WIDERSTÄNDE (LINKS); WIDERSTANDSERHÖHUNG DURCH LASERTRIMMEN VERSCHIEDENER SCHICHTEN (RECHTS)	165
ABBILDUNG 5-41: PROZESSABLAUF ZUR NASS-CHEMISCHEN STRUKTURIERUNG DER NiP-SCHICHTEN AUF LEITERPLATTEN	165

ABBILDUNG 5-42: NASS-CHEMISCHE HERGESTELLTE NiP-TESTBOARDS ZUM VERGLEICH DER STRUKTURGENAUIGKEIT	167
ABBILDUNG 5-43: ÜBERGANG ZWISCHEN KUPFER, NiP UND ISOLATOR EINER MITTELS LASERPROTOTYPING UND KUPFERÄTZENS GEFERTIGTEN PROBE	168
ABBILDUNG 5-44: PRINZIP DES MESSAUFBAUS ZUR IN-SITU-WIDERSTANDSMESSUNG BEIM EINLAMINIEREN DER GEDRUCKTEN HEIZSCHICHTEN	169
ABBILDUNG 5-45: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-1-HEIZSCHICHT	169
ABBILDUNG 5-46: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-2-HEIZSCHICHT	170
ABBILDUNG 5-47: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-3-HEIZSCHICHT	170
ABBILDUNG 5-48: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-5-HEIZSCHICHT	171
ABBILDUNG 5-49: TESTAUFBAU EINES LEITERPLATTEN-PRESSVORGANGES MIT ENDOGEN BEHEIZTEM LAMINAT (FÜNF PARALLELE HEIZSEGMENTE)	172
ABBILDUNG 5-50: BEISPIEL FÜR ELEKTRISCHE ANKONTAKTIERUNG EINER GEDRUCKTEN HEIZSCHICHT (CP-1) DURCH ÜBERDRUCK EINES KUPFERLEITERZUGES ($D = 35 \mu\text{m}$)	173
ABBILDUNG 5-51: BEISPIELE FÜR VEREINZELTE FEHLSTELLEN BEIM DRUCKPROZESS VON CARBON-GEMISCHEN AN LEITERZUGFLANKEN; MIT CP-1 BEI DRUCKRICHTUNG PARALLEL ZUR KUPFERFLANKE (LINKS); MIT CP-5 BEI DRUCKRICHTUNG SENKRECHT ZUR KUPFERFLANKE (RECHTS)	173
ABBILDUNG 5-52: VERMESSUNG DES NOTWENDIGEN ÜBERDRUCKS EINER CARBON-SCHICHT (HIER CP-1) AUF KUPFER; TESTLAYOUT MIT VARIERTEM ÜBERDRUCK UND GLEICHBLEIBENDEM R_{\square} (LINKS); ABHÄNGIGKEIT DES GEMESSENEN WIDERSTAND VOM ÜBERDRUCK BEZOGEN AUF DEN LETZTEN WERT (RECHTS)	174
ABBILDUNG 5-53: REM-AUFNAHME EINES QUERSCHLIFF MIT ÜBERGANG ZWISCHEN EINER KUPFERELEKTRODE ZU EINER CP-2- SCHICHT	174
ABBILDUNG 5-54: REM-AUFNAHME EINES QUERSCHLIFF MIT ÜBERGANG ZWISCHEN EINER KUPFERELEKTRODE ZU EINER CP-2- SCHICHT MIT VON EINEM KOCHER AUSGEHENDEM RISS.....	175
ABBILDUNG 5-55: QUERSCHLIFF AUFNAHMEN ELEKTRISCH ANKONTAKTIERTER NiP-SCHICHTEN; A) KUPFERELEKTRODE AUS TRÄGERKUPFER DER NiP-FOLIE; B) SACKLOCH MIT GALV. KUPFER AUF NiP-SCHICHT; C) ANKONTAKTIERUNG MIT DK DURCH NiP-SCHICHT	176
ABBILDUNG 5-56: SCHEMATISCHER QUERSCHNITT DURCH EINEN BESCHICHTUNGSFILM-SUBSTRAT-AUFBAU (LINKS) [47] UND EINEN FOLIE-PREPREG-SUBSTRAT-AUFBAU (RECHTS).....	177
ABBILDUNG 5-57: PRINZIPIELLER ABLAUF DER HIER DURCHGEFÜHRTEN GITTERSCHNITTPRÜFUNG	178
ABBILDUNG 5-58: BEISPIEL FÜR DAS ERGEBNIS DER GITTERSCHNITTPRÜFUNG AN AUFGEPRESSTEN FOLIENMATERIALIEN	179
ABBILDUNG 5-59: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES SCHERTESTES VERSCHIEDENER BESCHICHTUNGSSOFFE (LINKS) UND BEISPIELE FÜR FR-4-PROBENKÖRPER (RECHTS).....	179
ABBILDUNG 5-60: MITTELWERTE DER GEMESSENEN SCHERKRÄFTE MIT STANDARDABWEICHUNG FÜR VERSCHIEDENE CARBON- GEMISCHE AUF 5 MM X 5 MM FR-4-PROBENKÖRPERN MIT UND OHNE KUPFERBESCHICHTUNG	180
ABBILDUNG 5-61: REM-AUFNAHMEN EINES QUERSCHLIFF MIT BEREICHEN SCHLECHTER ADHÄSION ZWISCHEN FR-4-OBERFLÄCHE UND CP-4-SCHICHT	181
ABBILDUNG 5-62: TYPISCHE BRUCHBILDER DER ABGESCHERTEN CARBON-GEMISCHE.....	181

ABBILDUNG 5-63: MITTELWERTE DER GEMESSENEN SCHERKRÄFTE MIT STANDARDABWEICHUNG FÜR VERSCHIEDENE LACKSYSTEME AUF 5 MM X 5 MM FR-4-PROBENKÖRPERN MIT UND OHNE KUPFERBESCHICHTUNG	182
ABBILDUNG 5-64: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON NiP-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)	184
ABBILDUNG 5-65: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CARBON/POLYIMID-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)	185
ABBILDUNG 5-66: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-3-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)	186
ABBILDUNG 5-67: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-5-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)	186
ABBILDUNG 5-68: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-1-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)	187
ABBILDUNG 5-69: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-2-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)	188
ABBILDUNG 5-70: TEMPERATURVERTEILUNG EINER OFFENLIEGENDEN NiP-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME DER HEIZSEGMENTE (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER SEGMENTE MIT TEMPERATURDURCHSCHNITT UND TEMPERATURGRENZEN (RECHTS)	190
ABBILDUNG 5-71: QUERSCHLIFFE VON VOIDS IN DER PREPREGLAG E VON VERPRESSTEN MULTILAYERPROBEN	190
ABBILDUNG 5-72: TEMPERATURVERTEILUNG EINER EINGEBETTETEN NiP-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME VON DER 0,1 MM SEITE (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER TEMPERATUREN IN KONZENTRISCHEN, QUADRATISCHEN FLÄCHEN - KUMULATIV (RECHTS)	191
ABBILDUNG 5-73: TEMPERATURVERTEILUNG EINER EINGEBETTETEN CP-2-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER TEMPERATUREN IN KONZENTRISCHEN, QUADRATISCHEN FLÄCHEN - KUMULATIV (RECHTS)	192
ABBILDUNG 5-74: TEMPERATURVERTEILUNG EINER EINGEBETTETEN CP-3-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME VON 0,1 MM SEITE (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER TEMPERATUREN IN KONZENTRISCHEN, QUADRATISCHEN FLÄCHEN – KUMULATIV (RECHTS).....	192
ABBILDUNG 5-75: HORIZONTALE TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN TOP- UND BOTTOM-SEITE EINER BEHEIZTEN PROBE (LINKS); LATERALE TEMPERATURDIFFERENZ IM ABSTAND VON 5 MM ZUR HEIZFLÄCHE (RECHTS).....	193
ABBILDUNG 5-76: IR-AUFNAHMEN UND TEMPERATURPROFILE ÜBER DIE FLÄCHE EINER HEIZSCHICHT (CP-2) MIT: KEINER FEHLSTELLE (OBEN); 1 BOHRUNG ALS FEHLSTELLE (MITTE); 25 BOHRUNGEN ALS FEHLSTELLE (UNTEN)	194
ABBILDUNG 5-77: SIMULIERTE TEMPERATURVERTEILUNGEN AN FEHLSTELLEN IN EINER HOMOGENEN HEIZSCHICHT; 1 ZYLINDRISCHE FEHLSTELLE (OBEN); 25 ZYLINDRISCHE FEHLSTELLEN (UNTEN)	195
ABBILDUNG 5-78: AUSSCHNITT VOM CAD-LAYOUT EINER LEITERPLATTE MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT; KURZSCHLÜSSE IN DER VERDRAHTUNG DURCH HEIZSCHICHT (LINKS); SEGMENTIERTE HEIZSCHICHT MIT FREIFLÄCHEN FÜR DURCHKONTAKTIERUNGEN (RECHTS).....	195
ABBILDUNG 6-1: TEMPERATURPROFILE FÜR KONSEKUTIVE AUSLAGERUNG VON VERSCHIEDENEN HEIZSCHICHTEN	198
ABBILDUNG 6-2: MESSAUFBAU FÜR ERFASSUNG DER WIDERSTANDSÄNDERUNGEN BEI THERMISCHER AUSLAGERUNG	198
ABBILDUNG 6-3: ÄNDERUNGEN DES SCHICHTWIDERSTANDES AN FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) NICKEL- PHOSPHOR-HEIZSCHICHT BEI VERSCHIEDENEN THERMISCHEN AUSLAGERUNGEN	199

ABBILDUNG 6-4: ÄNDERUNGEN DES SCHICHTWIDERSTANDES AN FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) CP-2-HEIZSCHICHT BEI VERSCHIEDENEN THERMISCHEN AUSLAGERUNGEN	200
ABBILDUNG 6-5: ÄNDERUNGEN DES SCHICHTWIDERSTANDES AN FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) CP-3-HEIZSCHICHT BEI VERSCHIEDENEN THERMISCHEN AUSLAGERUNGEN	201
ABBILDUNG 6-6: KLIMATISCHES BELASTUNGSPROFIL FÜR DIE UNTERSUCHUNG DES FEUCHTEINFLUSS AUF HEIZSCHICHTEN (EINZELNER ZYKLUS)	202
ABBILDUNG 6-7: WIDERSTANDSVORLAUF VON FREILIEGENDER UND EINGEBETTETER CP-2-HEIZSCHICHT WÄHREND DREI ZYKLEN MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL	203
ABBILDUNG 6-8: WIDERSTANDSVORLAUF VON FREILIEGENDER UND EINGEBETTETER CP-3-HEIZSCHICHT WÄHREND DREI ZYKLEN MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL	204
ABBILDUNG 6-9: WIDERSTANDSVORLAUF VON FREILIEGENDER UND EINGEBETTETER C/PI-FOLIEN-HEIZSCHICHT WÄHREND EINES ZYKLUS MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL.....	204
ABBILDUNG 6-10: VERGLEICH DER WIDERSTANDSÄNDERUNGEN VON DREI CARBONGEFÜLLTEN POLYMEREN WÄHREND DREI ZYKLEN MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL.....	205
ABBILDUNG 6-11: WIDERSTANDSVORLAUF VON FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) NiP-SCHICHT WÄHREND EINES ZYKLUS MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL.....	205
ABBILDUNG 6-12: PROBENDEMONSTRATOR FÜR DAS LÖTEN MIT INDUKTIVER ERWÄRMUNG AN INTEGRIERTEN SUSZEPTOREN.....	207
ABBILDUNG 6-13: ERWÄRMUNG EINER LÖTDEMONSTRATOR-PROBE MIT KUPFERSUSZEPTOR IM ELEKTROMAGNETISCHEN QUERFELD	208
ABBILDUNG 6-14: BLOCKDIAGRAMME ZUR PROZESSSTEUERUNG INDUKTIVER LÖTPROZESSE IM QUERFELD (LINKS) UND IM LÄNGSFELD (RECHTS).....	208
ABBILDUNG 6-15: TEMPERATURPROFILE BEIM INDUKTIVEN LÖTEN MIT SUSZEPTOREN	209
ABBILDUNG 6-16: METALLOGRAPHISCHER QUERSCHLIFF EINES INDUKTIV GELÖTETEN BAUELEMENTES MIT KUPFER-SUSZEPTOR AUF DER UNTERSEITE DER PLATINE	210
ABBILDUNG 6-17: VERSUCHS- UND REGELUNGSANBAU FÜR DAS RESISTIVE LÖTEN MIT VERSCHIEDENEN DEMONSTRATOREN	211
ABBILDUNG 6-18: LÖTPROFILE FÜR DAS RESISTIVE LÖTEN MIT EINEN VOLLFLÄCHIG GEHEIZTEN NiP-SCHICHT (LINKS) UND EINEM NiP-HEIZSEGMENT (RECHTS).....	211
ABBILDUNG 6-19: DEMONSTRATOR FÜR VOLLFLÄCHIGES RESISTIVES LÖTEN (LÖTBEISPIEL 1); IR-AUFNAHME IM PEAK DES LÖTPROFILES (LINKS); UMSCHMELZERGEBNIS NACH DEM LÖTPROZESS (RECHTS).....	212
ABBILDUNG 6-20: DEMONSTRATOR FÜR SEGMENTWEISES RESISTIVES LÖTEN (LÖTBEISPIEL 2); IR-AUFNAHMEN DER AKTIVEN SEGMENTE 2512 UND 1206 (LINKS); TEMPERATURVERTEILUNG ÜBER DIE BREITE VON DREI SEGMENTEN FÜR UNTERSCHIEDLICH AKTIVE SEGMENTE (RECHTS)	213
ABBILDUNG 6-21: GEMESSENE SCHERKRÄFTE AN RESISTIV GELÖTETEN BAUELEMENTEN (2512 UND 1206) IM VERGLEICH ZU KONVEKTIV GELÖTETEN KOMPONENTEN (LOT: SnBi58).....	213
ABBILDUNG 6-22: TESTANORDNUNG FÜR SCHERKRAFTMESSUNGEN AN BEHEIZTEN PROBEN MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT	216
ABBILDUNG 6-23: IR-AUFNAHME EINES BEHEIZTEN SCHERTESTCOUPONS MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT AUF RÜCKSEITE	216
ABBILDUNG 6-24: GEMESSENE SCHERKRÄFTE AN BEHEIZTEN UND UNBEHEIZTEN TESTPLATINEN; ZWEPOLER AUF LAYOUT 2 (LINKS); VERSCHIEDENE DUMMY-KOMPONENTEN AUF LAYOUT 1 (RECHTS).....	217

ABBILDUNG 6-25: GEMESSENE TEMPERATUREN AN AKTIV GEALTERTEN PROBEN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN (3 ZYKLEN) ...	219
ABBILDUNG 6-26: TESTANORDNUNG FÜR EINE BESCHLEUNIGTE ALTERUNG VON PROBEN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN AN RAUMTEMPERATUR	220
ABBILDUNG 6-27: IR-AUFNAHME VON AKTIV BEHEIZTEN TESTBAUGRUPPEN WÄHREND EINES ALTERUNGSZYKLUS	220
ABBILDUNG 6-28: GEMESSENE SCHERKRÄFTE VON GELÖTETEN (SAC305 / DAMPFPHASE) 2512 UND 1206 CHIP-WIDERSTÄNDEN IM AUSGANGSZUSTAND (LINKS) UND NACH EINER BESCHLEUNIGTEN ALTERUNG (RECHTS)	221
ABBILDUNG 7-1: BEISPIELE FÜR VERSCHIEDENE INDUKTORGEOMETRIEN ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON FLÄCHIGEN PROBEN IM DURCHLAUFVERFAHREN (NACH [214])	223
ABBILDUNG 7-2: PRINZIPDARSTELLUNG ZUR VERWENDUNG VON LOT-PREFORM/SUSZEPTORFOLIEN (BSP.: NICKEL) ZUM INDUKTIVEN LÖTEN VON GROSSFLÄCHIGEN KOMPONENTEN (LINKS); QUERSCHNITT EINER VORBELOTETEN (TAUHLÖTEN) NICKELFOLIE (RECHTS)	224
ABBILDUNG 7-3: BEISPIEL FÜR EIN KOMBINIERTES THERMISCH-MECHANISCHES PRÜFVERFAHREN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN	228

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1-1: TYPISCHE BETRIEBSTEMPERATURBEREICHE IN DER ELEKTRONIK	4
TABELLE 2-1: VERSCHIEDENE ARTEN VON LEITERPLATTEN UND SCHALTUNGSTRÄGERN	11
TABELLE 2-2: ÜBERSICHT ÜBER VERSCHIEDENE BASISMATERIALTYPEN NACH DATEN AUS [33], [34], [35], [36], [37], [38].....	13
TABELLE 2-3: AUSWAHL VERSCHIEDENER GEWEBETYPEN [34]	16
TABELLE 2-4: AUSWAHL VERSCHIEDENER PREPREG-TYPEN UND DEREN DICKE NACH DEM VERPRESSEN [52]	19
TABELLE 2-5: FÜR DIE ELEKTRONIK RELEVANTE REINMETALLE MIT ELEKTRISCHER UND THERMISCHER LEITFÄHIGKEIT SOWIE PREIS [36]	20
TABELLE 2-6: TEMPERATURKOEFFIZIENTEN FÜR EINIGE AUSGEWÄHLTE METALLE UND LEGIERUNGEN [66], [67]	23
TABELLE 2-7: ÜBERSICHT VON OBERFLÄCHENSCHUTZSCHICHTEN AUF KUPFERLEITERN VON LEITERPLATTEN [73], [74], [75]	25
TABELLE 2-8: TYPISCHE ÄTZMEDIENTEN FÜR DIE KUPFERSTRUKTURIERUNG BEI LEITERPLATTEN [77], [76]	29
TABELLE 2-9: BEISPIELE EINIGER TYPISCHER LOTLEGIERUNGEN [90]	36
TABELLE 2-10: ÜBLICHE SIEBGRÖßEN FÜR DIE APPLIKATION VON LOTPASTE [96]	40
TABELLE 2-11: VERSCHIEDENE THERMISCHE AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN AM BEISPIEL TYPISCHER MATERIALIEN AUS DER ELEKTRONIK [108], [109], [110], [111]	47
TABELLE 2-12: BEISPIELE FÜR SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄTEN VON TYPISCHEN ELEKTRONIKMATERIALIEN [108], [126]	53
TABELLE 2-13: BEISPIELWERTE FÜR WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN [130], [123]	56
TABELLE 2-14: EMISSIONSGRADE VERSCHIEDENER OBERFLÄCHEN FÜR IR-STRAHLUNG BEI RAUMTEMPERATUR [108]	58
TABELLE 3-1: ÜBERSICHT VERSCHIEDENER ELEKTROWÄRMEVERFAHREN NACH TECHNOLOGIE UND ORT DER ENERGIEWANDLUNG (NACH [127])	60
TABELLE 3-2: PARAMETER FÜR DAS THERMISCHE MODELL EINER VEREINFACHTEN LEITERPLATTE MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT	80
TABELLE 3-3: ZUSAMMENFASSUNG DER ANFORDERUNGEN AN INTEGRIERTE HEIZSCHICHTEN IN LEITERPLATTE	96
TABELLE 4-1: RELATIVE PERMEABILITÄTEN FÜR VERSCHIEDENE STOFFE [184], [186]	99
TABELLE 4-2: ÜBERSICHT DER HIER UNTERSUCHTEN SUSZEPTORMATERIALIEN [212], [213]	119
TABELLE 5-1: EIGENSCHAFTEN EINER CARBON/POLYIMID-WIDERSTANDSFOLIE [225],	133
TABELLE 5-2: EIGENSCHAFTEN EINER NICKEL-PHOSPHOR/KUPFER-WIDERSTANDSFOLIE [233]	136
TABELLE 5-3: KENNDATEN VON UNTERSCHIEDLICHEN CARBON BASIERTEN LACKEN (LT. HERSTELLERANGABEN)	137
TABELLE 5-4: OPTIMIERTE LASERPARAMETER FÜR DAS STRUKTURIERUNG VERSCHIEDENER HEIZSCHICHTEN MITTELS LASER.....	164
TABELLE 5-5: ABTRAG EINER NiP-SCHICHT BEIM ÄTZEN MIT CuSO_4	166
TABELLE 5-6: QUALITATIVE KLASSIFIZIERUNG DER GITTERSCHNITTPRÜFUNG VERSCHIEDENER HEIZSCHICHTMATERIALIEN NACH ASTM D 3359 [276]	178
TABELLE 5-7: EXPERIMENTELL ERMITTELTE EMISSIONSKOEFFIZIENTEN EINIGER HEIZSCHICHTEN	183
TABELLE A-1: BEISPIELE FÜR BERECHNETE VERLUSTKOEFFIZIENTEN MIT HILFE VON STÜTZSTELLEN AUS DATENBLÄTTERN	231

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	<i>Acrylnitril Butadien Styrol</i> – ein thermoplastisches Polymer
ACA	<i>Anisotropic Conductive Adhesive</i> (engl.) / anisotrop (gerichtet) leitender Klebstoff
AR	<i>Acrylic Resin</i> (engl.) / Acrylharz
AVT	<i>Aufbau- und Verbindungstechnik</i>
BE	<i>Bauelement</i>
BGA	<i>Ball Grid Array</i> (engl.) / Bauform mit Anschlüssen in Kugelmatrixanordnung
BT	<i>Bismaleimid Triazin</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (engl.) / rechnerunterstütztes Konstruieren
CAF	<i>Conductive Anodic Filament</i> (engl.) / leitender Faden an der Anode (beginnend) - Ausfallmechanismus
CNT	<i>Carbon Nano Tube</i> (engl.) / Kohlenstoffnanoröhre
CTE	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i> (engl.) / Wärmeausdehnungskoeffizient
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> (engl.) / Chemische Gasphasenabscheidung
DC	<i>Direct Current</i> (engl.) / Gleichstrom
DCB	<i>Direct Copper Bond</i> (engl.) / direkte Kupferbeschichtung
DIP-xx	<i>Dual In-line Package</i> (engl.) / zweireihiges Gehäuse (xx \triangleq Anzahl der Anschlüsse)
DK	<i>Durchkontaktierung</i> (vgl. VIA)
ENIG	<i>Electroless Nickel Immersion Gold</i> (engl.) / stromlos Nickel chemisch Gold
ESB	<i>Ersatzschaltbild</i>
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i> (engl.) / Elektrostatische Entladung
FC	<i>Flip-Chip Mounting</i> (engl.) / „Wende-Montage“ von ungehäuten Halbleiterchips
FEM	<i>Finite Element Method</i> (engl.) / Finite-Elemente-Methode
FET	<i>Field-Effect Transistor</i> (engl.) / Feldeffekttransistor
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> (engl.) / Schmelzfilamentherstellung
FR-4	Klasse von flammhemmenden (<i>Flame Retardant</i> (engl.)) Epoxid-Glasfaser-Verbundwerkstoffen
HASL	<i>Hot Air Solder Leveling</i> (engl.) / Heißluftlot-Nivellierung o. Heißverzinnung
HAST	<i>High Accelerated Temperature and Humidity Stress Test</i> (engl.) / Hoher Belastungstest bei beschleunigter Temperatur und Feuchtigkeit
HF	<i>Hochfrequenz</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i> (engl.) / Integrierter Schaltkreis

ICA	<i>Isotropic Conductive Adhesive</i> (engl.) / Isotrop (ungerichtet) leitfähiger Klebstoff
ImAg	<i>Immersion Silver</i> (engl.) / chemisch Silber
IMS	<i>Insulated Metal Substrate</i> (engl.) / Metallkern-Leiterplatte
ImSn	<i>Immersion Tin</i> (engl.) / chemisch Zinn
IR	<i>Infrarot</i>
IST	<i>Interconnect Stress Test</i> (engl.) / Belastungstest an Durchkontaktierungen
LP	<i>Leiterplatte</i>
LCP	<i>Liquid Crystal Polymer</i> (engl.) / flüssigkristallines Polymer
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (engl.) / Leuchtdiode
LTCC	<i>Low Temperature Cofired Ceramics</i> (engl.) / Niedertemperatur-Einbrand-Keramiken
LWL	<i>Lichtwellenleiter</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical System</i> (engl.) / Mikroelektromechanisches System
MID	<i>Molded Interconnect Device</i> (engl.) / Spritzgegossener Schaltungsträger
ML	<i>Multilayer</i> (engl.) / Mehrlagenplatine
NCA	<i>Non Conductive Adhesive</i> (engl.) / nicht leitender Klebstoff
Nd:YAG	<i>Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat</i> (Laser)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (engl.) / negativer Temperaturkoeffizient
NTS	<i>Niedertemperatur Sintern</i>
OFET	<i>Organic Field Effect Transistor</i> (engl.) / Organischer Feldeffekttransistor
OLED	<i>Organic Light Emitting Diode</i> (engl.) / Organische Leuchtdiode
OPL	<i>Optical Path Length</i> (engl.) / optische Weglänge
OPVC	<i>Organic Photovoltaic Cells</i> (engl.) / Organische Solarzelle
OSP	<i>Organic Solderability Preservatives</i> (engl.) / organische Lötbarkeitskonservierung
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (engl.) / Leiterplatte
PEEK	<i>Polyetheretherketone</i>
PI	<i>Polyimid</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative Controller</i> (engl.) / Proportional Integral Differential Regler
Prepreg	<i>Preimpregnated Fibers</i> (engl.) / Vorimprägnierte Fasern
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i> (engl.) / positiver Temperaturkoeffizient
PTFE	<i>Polytetrafluorethylen</i> (besser bekannt unter dem Markennamen Teflon®)

PUR	<i>Polyurethan</i>
PVC	<i>Polyvinylchlorid</i>
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> (engl.) / physikalische Gasphasenabscheidung
QFN	<i>Quad Flat No Leads Package</i> (engl.) / quaderförmiges Gehäuse ohne Anschlussbeinchen
REM	<i>Rasterelektronenmikroskop</i>
RMS	<i>Root-mean-squared roughnes</i> (engl.) / gemittelte Rautiefe
RoHS	<i>Restriction of Hazardous Substances</i> (engl.) / Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe (in Elektro- und Elektronikgeräten)
RS-xxx	<i>Recommended Standard</i> (engl.) / Standardisierte Schnittstelle (z.B. RS-232, RS-485)
SiP	<i>System-in-Package</i> (engl.) / System in einem Gehäuse
SIR	<i>Surface Insultation Resistance</i> (engl.) / Oberflächenwiderstand
SMD	<i>Surface Mount Device</i> (engl.) / oberflächenmontiertes Bauelement
SMT	<i>Surface Mount Technology</i> (engl.) / Oberflächenmontage
SO-xx	<i>Surface Outline</i> (engl.) / ‚Kleiner Grundriss‘ – Gehäuseform (xx \triangleq Anzahl der Anschlüsse)
SPS	<i>Speicherprogrammierbare Steuerung</i>
TCB	<i>Thermalcompression Bonding</i> (engl.) / Thermokompressions-Bonden
TE	<i>Thermoelement</i>
TGA	<i>Thermogravimetrische Analyse</i>
THD	<i>Through Hole Device</i> (engl.) / Durchsteckmontiertes Bauelement
THT	<i>Through Hole Technology</i> (engl.) / Durchsteckmontage
TTT	<i>Time-Temperature-Transiation</i> (engl.) / Zeit-Temperatur-Übergang
US	<i>Ultrasonic</i> (engl.) / Ultraschall
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (engl.) / Universelle Serielle Schnittstelle
UV	<i>Ultraviolett</i>
VCC	<i>Voltage at the Common Collector</i> (engl.) / Anschluss der positiven Versorgungsspannung
VIA	<i>Vertical Interconnect Access</i> (engl.) / Durchkontaktierung

VERWENDETE SYMBOLE

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A, A_0	$[m^2]$	Fläche, Fläche im Anfangszustand
α	$\left[\frac{1}{K}\right]$	Linearer Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstand
α_{CTE}	$\left[\frac{ppm}{K}\right]$	thermischer Ausdehnungskoeffizient (CTE)
α_K	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	(konvektiver) Wärmeübergangskoeffizient
B	$[T]$	magnetische Flussdichte
B_{NTC}	$[K]$	materialspezifische Konstante für NTC-Thermistoren
b	$[m]$	Breite
BF		Beschleunigungsfaktor
C	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Wärmekapazität
c	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	spezifische Wärmekapazität
CM		Coffin-Manson-Exponent
d	$[m]$	Dicke
δ	$[m]$	Eindringtiefe (Skin Effekt)
E	$\left[\frac{V}{m}\right]$	elektrische Feldstärke
E_A	$[eV]$	Aktivierungsenergie
E_M	$[Pa]$	Elastizitätsmodul
ϵ		Emissionsgrad
ε	$\left[\frac{F}{m}\right]$	Permittivität
F_{max}	$[N]$	maximale Kraft
f	$\left[\frac{1}{s}\right], [Hz]$	Frequenz
H	$\left[\frac{A}{m}\right]$	magnetische Feldstärke
h_S	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung
I	$[A]$	elektrische Stromstärke

J	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$	elektrische Stromdichte
κ	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	Wärmeleitfähigkeit
k_B	$\left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{K}} \right]$	Boltzmann-Konstante
k_h, k_w, k_a, n		Verlustkoeffizienten für Berechnung von Hysterese-, Wirbelstrom- und Anomalieverlustleistungen (nach Bertotti)
l, l_0	[m]	Länge, Länge im Anfangszustand
L	$\left[\frac{\text{W} \cdot \Omega}{\text{K}^2} \right]$	Lorenz-Zahl
λ	[nm]	Wellenlänge
λ_A	[1/dt]	Ausfallrate
N		Anzahl der Windungen (Spule)
N_f	[h], [d], [a]	Lebensdauer
m	[kg]	Masse
μ	$\left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$	Permeabilität
μ_e	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \right]$	Elektronenbeweglichkeit
P	[W]	Leistung
P_h, P_w, P_a	[W/kg]	Hysterese-, Wirbelstrom- und Anomalieverluste
Q, q	[J]	Wärmeenergie
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
\dot{Q}_K	[W]	Wärmestrom durch Konvektion
\dot{Q}_S	[W]	Wärmestrom durch Strahlung
r	[m]	Radius
R, R_T, R_0	[Ω]	elektrischer Widerstand, Widerstand bei Temperatur T, Widerstand im Ausgangszustand (i.d.R. Raumtemperatur)
R_{\square}	[Ω], [Ω/\square]	Schicht- oder Flächenwiderstand
R_{th}	$\left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$	thermischer Widerstand
$R_{th,\kappa}$	$\left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$	Wärmeleitwiderstand
$R_{th,\alpha}$	$\left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$	Wärmeübergangswiderstand

VERWENDETE SYMBOLE

RH	[% r. F.]	relative Luftfeuchtigkeit
ρ	$[\Omega\text{m}], \left[\Omega\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}\right]$	spezifischer elektrischer Widerstand
ρ_D	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Dichte
σ_B	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}\right]$	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ	$\left[\frac{\text{S}}{\text{m}}\right]$	elektrische Leitfähigkeit
τ	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Scherfestigkeit
T	[°C], [K]	Temperatur
T_0	[K]	Temperatur im Anfangszustand
T_C	[°C]	Curietemperatur
T_D	[°C]	Zersetzungstemperatur
T_G	[°C]	Glasübergangstemperatur
T_L	[°C]	Liquidustemperatur
T_S	[°C], [K]	Schmelztemperatur
t	[s]	Zeit
U	[V]	elektrische Spannung
V, V_0	[m ³]	Volumen, Volumen im Anfangszustand
v_∞	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	Strömungsgeschwindigkeit

1. EINLEITUNG

1.1 EINSTIEG IN DAS THEMENGEBIET

Die Leiterplatte bildet seit vielen Jahrzehnten einen integralen Bestandteil sämtlicher Elektronik auf der Welt. Naturgemäß hat die Entwicklung der Leiterplattentechnologie bereits viele Iterationen und Wandlungen durchschritten. Was in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts als relativ einfacher Aufbau aus Isolatormaterial (Hartpapier) und maximal zweiseitiger Verdrahtungsebene begann, hat sich mittlerweile zu einem hochintegrierten System aus strapazierfähigen Verbundmaterialien mit bis zu 64 Signallagen (und mehr) entwickelt. (Abbildung 1-1)

Leiterplatten damals
und heute

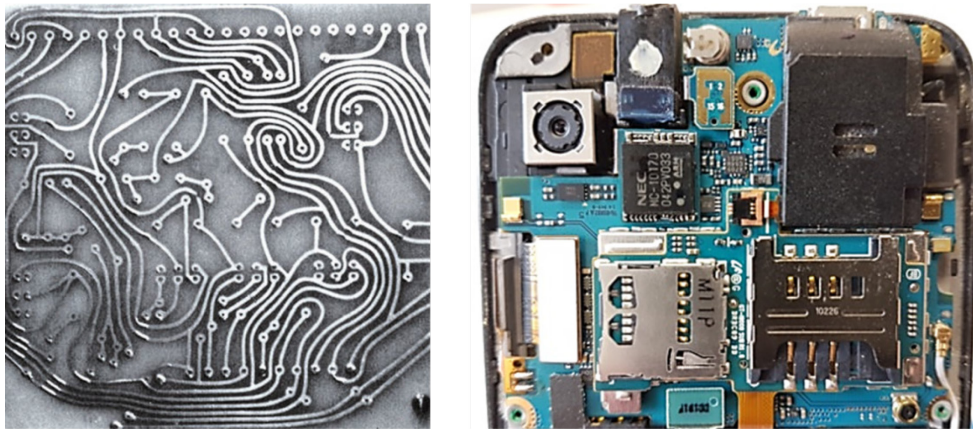


ABBILDUNG 1-1: BEISPIELE FÜR LEITERPLATTEN: EIN PLATINE [1] VON CA. 1950 (LINKS) UND PLATINEN VERBAUT IN EINEM SMARTPHONE VON 2012 (RECHTS)

Ein treibender Faktor hinter dieser Weiterentwicklung ist zum einen die voranschreitende Miniaturisierung von Bauteilen und Systemen. Hierunter versteht man die Verringerung von Masse und Volumen bei elektronischen Komponenten und Modulen gepaart mit einer Steigerung der Leistungsdichte. Anhand des Moore'schen Gesetzes [2] lässt sich dieser Trend im Bereich der Mikroelektronik empirisch belegen. Ein weiterer Faktor ist die Entwicklung neuer Technologien und Materialien, welche eine immer weiter steigende Integrationsdichte überhaupt erst möglich machen.

Entwicklungstrend

Auf Gehäuseebene geht der Trend zur Systemintegration von unterschiedlichen Komponenten (IC's, passive Bauelemente, MEMS u.a.) in ein Gehäuse (Package), was als System-in-Package (SiP) bekannt ist. [3] Eine der Technologien hierfür ist das Einbetten (Embedding) von passiven, aktiven und sensorischen Komponenten, wodurch ein dreidimensionaler Aufbau erzeugt wird (Abbildung 1-2), der neben der Platzersparnis auch kurze Signalwege und einen hohen Grad der Miniaturisierung ermöglicht.

Systemintegration
durch Embedding

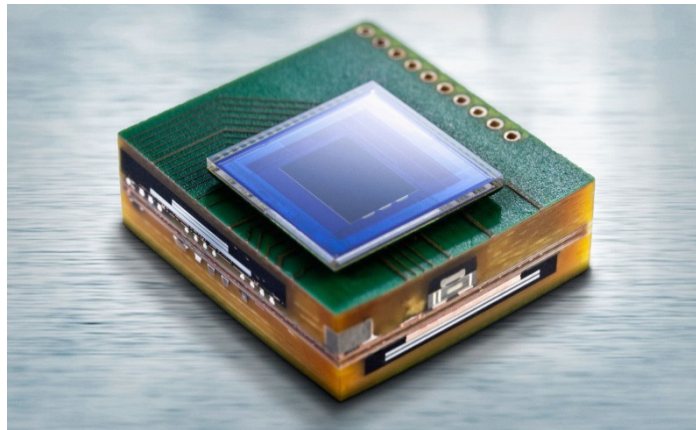


ABBILDUNG 1-2: REALISIERUNG EINES MINIATURISIERTEN KAMERAMODULS MITTELS 3D-INTEGRATION [4]

Damit einher geht der Trend in der Leiterplattentechnologie zur In-Board-Integration, also der Integration von Komponenten, funktionalen Strukturen und Systemen in das Innere der Leiterplatte. Die Funktion der Platine als reines Trägermaterial für Leitungen und Bauelemente wird somit erweitert zu einer multifunktionalen Leiterplatte. Eine Reihe von Beispielen für verschiedene Anwendungen in dieser multifunktionalen Leiterplatte sind in Abbildung 1-3 dargestellt.

Multifunktionale
Leiterplatte

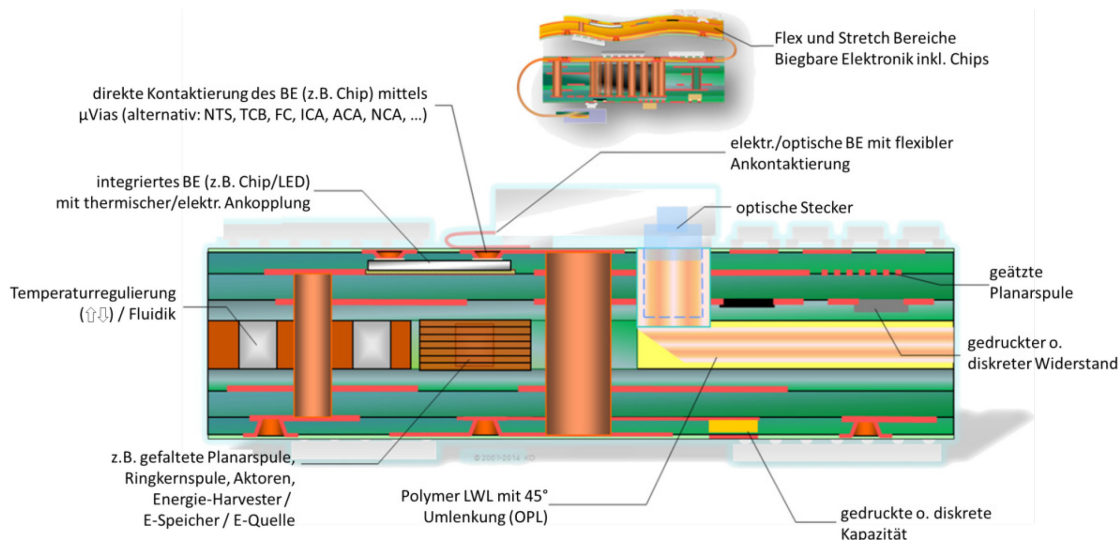


ABBILDUNG 1-3: SKIZZE FÜR VERSCHIEDENE ANWENDUNGEN IN EINER MULTIFUNKTIONALEN LEITERPLATTE [5]

Obwohl sich ein Großteil der derzeitigen Untersuchungen und Anwendungen zur 3D-Integration auf das Wafer- bzw. Chip-Level beziehen, gibt es auch eine Vielzahl von Veröffentlichungen, welche die Integration auf Substrat-Level beschreiben - gemeint ist hier die Leiterplatte als unterste Ebene und weniger das Substrat als Interposer oder ähnlichem. Es finden sich aktuelle Untersuchungen und Anwendungen für die Integration von

Vielfalt einer Multi-
funktionalen Leiter-
platte

- passiven Bauelementen als Schaltungsbestandteil [6], Sensorelement [7] oder Kühlstruktur [8]
- aktiven Bauelementen [9], [10]
- Piezoelektrika als Energiewandler [11]
- Lichtwellenleitern auf Polymerbasis [12]
- mikrofluidische Strukturen [13], [14]
- Vibrationssensoren [15]
- u.v.m.

Die Leiterplatte wird demnach immer intelligenter und ist in der Lage, Aufgaben und Funktionen zu übernehmen, welche zuvor entweder nicht möglich waren oder wofür externe Komponenten erforderlich waren. Zu dieser Entwicklung soll mit dieser Arbeit ein Beitrag geleistet werden, indem die technologische Realisierbarkeit und demonstrative Anwendungen für eine sich von innen heraus (endogen) erwärmende Leiterplatte mittels integrierter Heizschichten untersucht werden sollen.

Anknüpfungspunkt
dieser Arbeit

1.2 MOTIVATION UND FRAGESTELLUNG

Wärme und Temperatur sind in der Elektronik allgegenwärtig und gewissermaßen Fluch und Segen zugleich. Im laufenden Betriebszustand unterliegt Elektronik stets einer Eigenerwärmung infolge von ohmschen Verlusten am elektrischen Leiter sowie von Schalt- und Durchgangsverlusten am p-n-Übergang eines Halbleiters. Im Allgemeinen geht mit einer Temperaturänderung auch immer eine Veränderung der stofflichen Parameter jener Materialien einher, welche einem Temperaturgradienten ausgesetzt sind. Temperaturänderungen beeinflussen sowohl die mechanischen als auch die elektrischen Eigenschaften von elektronischen Baugruppen. So führt zum Beispiel eine Temperaturerhöhung auf einer Baugruppe im Betrieb zur Veränderung der elektrischen Leitfähigkeiten von Metallen und Halbleitern, wodurch ab einer bestimmten Temperatur die elektrische Funktionalität gestört bzw. nicht mehr gegeben ist. Bei höheren Temperaturen und in Abhängigkeit des verwendeten Materials ist die Veränderung der temperaturabhängigen Eigenschaften nicht mehr reversibel, was zur Schädigung oder zur Zerstörung der elektronischen Apparatur führen kann.

Temperatur und
Elektronik

Daher haben sich im Elektronikbereich spezifische Temperaturbereiche für den zuverlässigen Betrieb von Baugruppen etabliert, welche vorgeben, in welchen Temperaturgrenzen die verbauten Materialien und Komponenten funktionieren müssen. Tabelle 1-1 zeigt übliche Temperaturbereiche für verschiedene Einsatzgebiete.

Temperaturbereiche
für Elektronik

TABELLE 1-1: TYPISCHE BETRIEBSTEMPERATURBEREICHE IN DER ELEKTRONIK

Kategorie	Temperaturbereich	Typische Anwendungen	Quelle
Consumer Computer Computer/Peripherie	0 °C bis 70 °C 15 °C bis 60 °C 0° bis 60 °C	Heim- und Unterhaltungselektronik	[16] [17] [18]
Industrie , Telekom- munikation	-40 °C bis 85 °C	Industrieanlagen, Steuerung, Regelung	[16], [17], [18]
Automotive Motorraum	-40 °C bis 125 °C -55 °C bis 125 °C	Automobilelektronik, Motorsteuerung, Sensoren	[16] [17], [18]
Aerospace	-55 °C bis 150 °C	Bohrtechnik, Luft- und Raumfahrt	[16]

Anhand dieser Bereiche lassen sich die Materialien und Prozesse für ein spezifisches Produkt auswählen. Im Consumer-Bereich kann wegen der geringen Anforderungen relativ kostengünstig gefertigt werden, was aber auch mit einer relativ kurzen Lebensdauer von 1 – 3 Jahren [17], [18] verbunden ist. Hingegen werden im Automotive-Bereich Lebensdauern zwischen 10 - 15 Jahren [17] gefordert, wodurch sich der Fertigungsaufwand erhöht.

Die thermische Systemgestaltung von elektronischen Systemen gewinnt daher zunehmend an Bedeutung. Hierzu gehört zum einen das Abwärme-Management der entstehenden Verlustleistungen auf elektronischen Baugruppen, deren Dichte durch die steigende Integration und Miniaturisierung mehr und mehr zunimmt. Ziel ist es hierbei, die Wärme möglichst schnell und effizient zu verteilen und abzuführen. Ausgewählte Beispiele der zahlreichen aktuellen Forschungsarbeiten, welche sich intensiv mit Kühlkonzepten für elektronische Baugruppen auseinandersetzen, sind in [19] und [20] als applikativer Zusatzstoff auf der Baugruppe oder in [21] und [22] als integrierbares Kühlkonzept in die Leiterplatte beschrieben.

Thermische Systemgestaltung zum Kühlen

In einer Gegenüberstellung in Abbildung 1-4 sind die Beispiele für typische Auswirkungen von Erwärmungsprozessen auf Leiterplatten und elektronischen Baugruppen unterteilt dargestellt. Hierbei ist es zunächst zweckmäßig, zwischen dem Fertigungsprozess und dem späteren Betriebszustand der Baugruppe zu differenzieren, da sich hier die Belastungsmechanismen und Ansprüche an das Objekt grundlegend unterscheiden. Darüber hinaus soll hier anhand verschiedener Beispiele in nutzbare und negative Auswirkungen von Temperatureinflüssen unterteilt werden. Als negative Auswirkungen werden hier alle Arten von unerwünschten, aber häufig nicht vermeidbaren, Einflüssen auf die Materialien und Elektronik angesehen. Diese degradierenden Einflüsse wirken sich reduzierend auf Lebensdauer und Funktion aus. Soweit möglich, werden die ein-

Auswirkungen thermischer Prozesse auf Leiterplatten

zelen Beispiele in Abbildung 1-4 mit typischen Temperaturbereichen bzw. Temperaturabhängigkeiten versehen.

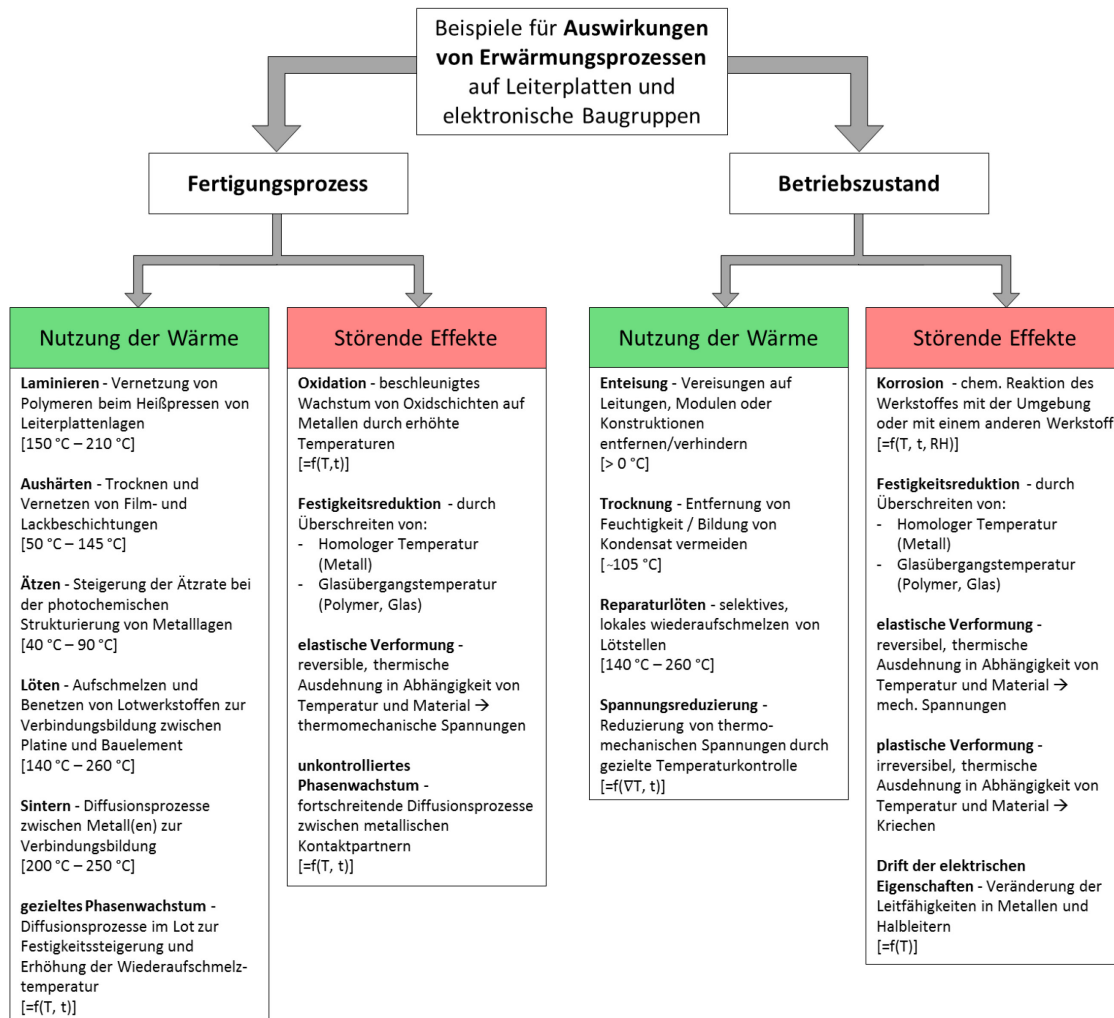


ABBILDUNG 1-4: QUALITATIVE GEGENÜBERSTELLUNG EXEMPLARISCHER AUSWIRKUNGEN VON ERWÄRMUNGSPROZESSEN AUF LEITERPLATTEN UND BAUGRUPPEN

Auf der anderen Seite werden alle erwünschten beziehungsweise notwendigen thermischen Einflüsse als nutzbar klassifiziert. Die nutzbaren Effekte erfordern stets die kontrollierte Zuführung der thermischen Energie an die Leiterplatte zur Nutzung im technologischen Prozess. Für die Bereitstellung der Wärme wird in der Regel zusätzliche Anlagentechnik benötigt. Die meisten Heizabläufe, wie zum Beispiel Schmelz-, Trocknungs- oder Aushärteprozesse, basieren in der industriellen Fertigung primär auf konvektiven Wärmeübertragungsverfahren (Öfen, Düsen, ...) mit Luft bzw. Stickstoff als Energieträger. Zum Teil werden diese Prozesse auch durch den zusätzlichen Einsatz von Infrarotheizern unterstützt. [23]

Herkömmliche Heizprozesse

Die Effizienz solcher Erwärmungsprozesse liegt aus energetischer Sicht nicht selten weit hinter der von konduktiven Verfahren. In [24] und [25] wird die Problematik der energetischen Ineffizienz am Beispiel von konvektiven Reflowlötprozessen deutlich. Zudem beinhaltet das Erwärmen mit erzwungener Konvektion die Schwierigkeit, dass Abschattungen durch große und/oder flächige Bauelemente (z.B. Ball Grid Array (BGA)) eine Unterbrechung im strömenden Fluid verursachen, wodurch nicht ausreichend Wärme an die entsprechenden Stellen (Lötstellen) herangeführt werden kann. Zur Gewährleistung der geforderten Qualität werden immer häufiger Vakuumprozesse erforderlich, bei welchen der Einsatz der Konvektion als Heizmethode nicht möglich ist. Ebenfalls durch Abschattungseffekte behindert wird die Erwärmung mittels Strahlung (z.B. Infrarot-Heizer). Bei durch Wärmeleitung dominierten Prozessen, zum Beispiel beim Einsatz von Heizplatten, besteht allerdings häufig das Problem, dass keine hinreichend gute thermische Ankopplung zwischen thermischer Quelle und Leiterplatte bzw. Baugruppe erreicht werden kann. Selbst bei der Anbindung von parallelen Flächen führen Mikrorauigkeiten an den Grenzflächen zu einem erhöhten thermischen Widerstand. Hinzu kommen weitere geometrische Unregelmäßigkeiten auf Leiterplatten durch Leiterzüge, Bauelemente, selektive Beschichtungen, Verformungen und andere.

Energetische Ineffizienz und Erwärmungsproblematik

Aus all diesen beschriebenen Umständen leitet sich die primäre Zielstellung dieser Arbeit ab. Das Ziel besteht in dem experimentellen Aufbau eines Heizsystems, welches in die Leiterplatte integriert werden kann. Hierbei liegen die Schwerpunkte auf der Auswahl einer geeigneten Heizmethode sowie entsprechend einsetzbarer Materialien und die Charakterisierung des technologischen Fertigungsprozesses. An geeigneten Demonstratoren soll schließlich die generelle Machbarkeit sowie eine mögliche Anwendung dargestellt werden. Die schematische Darstellung einer möglichen Systemlösung für eine endogen beheizte Leiterplatte ist in Abbildung 1-5 dargestellt.

Zielstellung dieser Arbeit

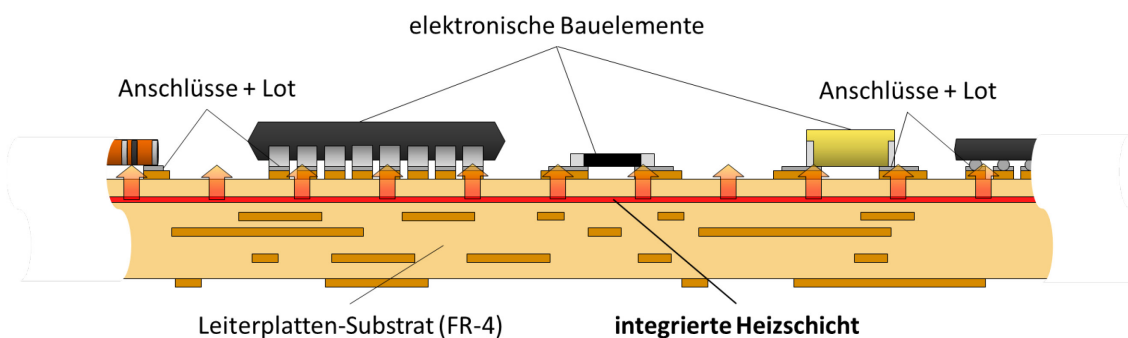


ABBILDUNG 1-5: PRINZIP EINER INTEGRIERTEN HEIZSCHICHT IN LEITERPLATTEN

Mit der physischen Integration eines Heizsystems auf oder in das Leiterplattenmaterial soll ein stoffschlüssiger Übergang zwischen beiden erreicht werden. Eine Freisetzung von Wärmeenergie durch das System würde dann quasi aus dem Inneren der Leiterplatte/Baugruppen (endogen) heraus erfolgen und bis hin zu den äußeren Grenzflächen ausschließlich durch Wärmeleitungsvorgänge transportiert werden. Hierbei ist davon auszugehen, dass der Heizprozess mit einer deutlich höheren energetischen Effizienz erfolgen kann, als es exogene Heizvorgänge erlauben.

Endogen beheizte
Leiterplatte

Die Erarbeitung dieser Dissertation erfolgte im Rahmen einer Kooperation („INHaLT“) mit der Siemens AG (Berlin). Die Siemens AG unterstützte die Forschungsarbeiten finanziell sowie fachlich. Des Weiteren sind Teile dieser Arbeit im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes („ERFEB“ – Förderkennzeichen: 03ET1533) entstanden, das vom Projektträger Jülich und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird.

Forschungscoopera-
tionen

1.3 AUFBAU DER ARBEIT

In diesem Abschnitt soll kurz der Aufbau der hier vorliegenden Arbeit dargestellt werden. Um den Umgang mit dieser Arbeit zu erleichtern, befinden sich Marginalien am rechten Seitenrand. Diese kleinen Abschnittsüberschriften sollen den Leser beim Finden bestimmter Inhalte unterstützen. Zudem befinden sich auf den ersten Seiten Verzeichnisse mit Abkürzungen, Kurzformen und Formelzeichen, welche in dieser Arbeit genutzt werden. In den meisten Fällen beziehen sich die Abkürzungen auf Begriffe aus dem englischen Sprachraum, welche sich in diesem Fachgebiet mittlerweile global etabliert haben.

Formatierung

Kapitel 1 beginnt mit einer Einleitung in das Fach- und Themengebiet, zu welchem diese Arbeit einen Beitrag leisten will. Hieraus werden die Motivation sowie die damit verbundenen Fragestellungen abgeleitet. In Kapitel 2 werden die Grundlagen, die einen kurzen, aber dennoch möglichst umfassenden Einblick in die fachlichen Schwerpunkte geben sollen, welche zum Verständnis der Arbeit notwendig sind, vorgestellt. Hierzu gehören die Leiterplatten- und Baugruppentechologie, die damit verbundenen Materialgrundlagen und Prozesse sowie Grundlagen der Thermodynamik. Die Bearbeitung der hier gestellten Aufgabe beginnt in Kapitel 3 mit einer theoretischen Vorbeurteilung der Erwärmung von Leiterplatten sowie einer Abbildung des hierzu gehörenden Standes der Technik. Die praktischen Untersuchungen zur Integration von Heizstrukturen in Leiterplatten werden in den Kapiteln 4 (induktive Erwärmung) und 5 (resistive Erwärmung) vorgestellt. Aus Gründen der technischen Umsetzbarkeit liegt der Schwerpunkt der Arbeit hierbei auf den einfacheren, resistiven Strukturen, welche ohne

Inhalt der Kapitel

den Einsatz von äußeren elektromagnetischen Feldern genutzt werden können. In Kapitel 6 wird an einigen Beispielen die Anwendbarkeit der hier untersuchten Lösungen vorgestellt sowie eine Bewertung der Langzeitstabilität der entwickelten resistiven Strukturen durchgeführt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einigen Vorschlägen für weiterführende Forschungen auf dem Gebiet.

2. GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

In diesem Grundlagenkapitel sollen die Technologien und Prozesse dargestellt werden, welche zur Bearbeitung und zum Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig sind. Des Weiteren soll anhand dessen der derzeitige Stand der Technik im Bereich der Elektroniktechnologie dargestellt werden. Die hier zu bearbeitende Aufgabenstellung zur Integration von Heizschichten in Leiterplatten erfordert Kenntnisse über die technologische Wissensbasis der Leiterplattentechnik und deren Fertigungsprozesse. Durch die Anwendungsdefinition der Heizsysteme im Fertigungsprozess sowie im späteren Betrieb der Produkte dehnen sich die Wissensanforderungen auch auf die Bereiche Aufbau- und Verbindungstechnik sowie elektronische Baugruppenteknologie aus. Ebenso relevant ist das Verständnis physikalischer Grundlagen und Zusammenhänge auf dem Gebiet der Wärmelehre, da die gezielte Objekterwärmung und die damit verbundenen Mechanismen integraler Bestandteil dieser Arbeit sind.

Übersicht der Grundlagen

2.1 GRUNDLAGEN DER LEITERPLATTENTECHNOLOGIE

Die VDI/VDE-Richtlinie 3710 [26] definiert eine Leiterplatte als ein Verbindungselement und Bauteilträger mit elektrisch leitenden, festhaftenden Verbindungen in oder auf einem Isolierstoff. In dieser Arbeit ist mit dem Begriff „Leiterplatte“ stets die einzelne, nicht bestückte Platine gemeint, wohingegen die bestückte Leiterplatte hier als „Baugruppe“ bezeichnet wird. Häufig wird auch die Abkürzung „PCB“, welche das englische „printed circuit board“ meint, verwendet. Der Ausdruck „gedruckte Schaltung“ ergründet sich eher in der Historie zur Fertigung der Leiterplatte, als noch metallhaltige Druckmedien zur Erzeugung der Leiterzüge verwendet wurden [27] oder chemikalienresistente Druckfarbe als Ätzresist auf eine Kupferschicht gedruckt wurde [28]. Der applizierende Druck von funktionalen Fluiden findet aber nach wie vor Anwendung in der Elektroniktechnologie, wie zum Beispiel beim Druck von organischen Materialien zur Erzeugung von OLEDs, OFETs oder OPVCs. Nach DIN 40804 [29] ist lediglich der Begriff „Leiter“ als Bezeichnung für die elektrischen Verdrahtungen genormt. Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass in dieser Dissertation auch die landläufigen Begriffe „Leiterbahn“ oder „Leiterzug“ verwendet werden, um diese Strukturen zu benennen.

Begriffsdefinitionen

2.1.1 AUFBAU UND ARTEN VON LEITERPLATTEN

Im Wesentlichen besteht eine Leiterplatte aus einem elektrisch isolierenden Trägermaterial (Substrat) und einer leitfähigen Beschichtung. Das Substrat bildet dabei das mechanische Fundament für die Fixierung von allen elektronischen Bauteilen und Leiterbahnen, welche zur Funktion der späteren Baugruppe beitragen. Abbildung 2-1 zeigt den generellen Aufbau des Basismaterials einer klassischen, starren Leiterplatte mit seinen einzelnen Komponenten und den wichtigsten Eigenschaften, welche mit diesen verbunden sind. Auf die einzelnen Komponenten wird im Verlauf des Kapitels noch etwas detaillierter eingegangen.

Aufbau einer Leiterplatte

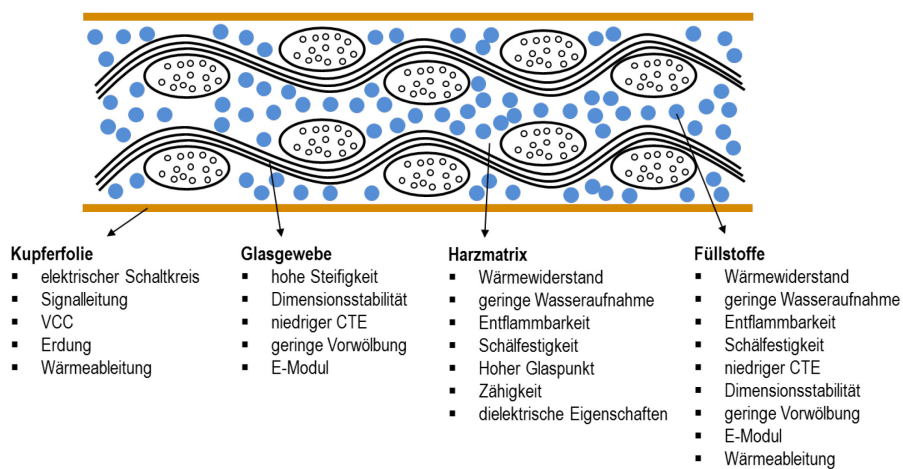

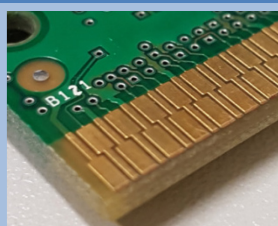


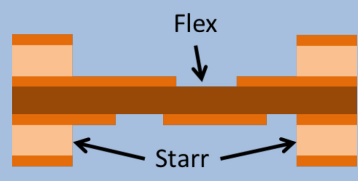
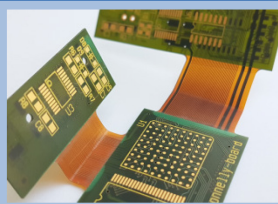
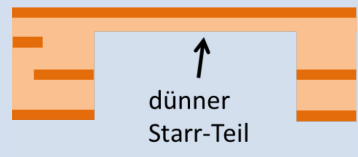
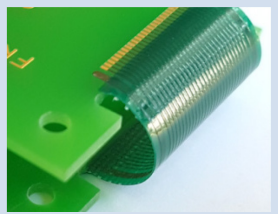

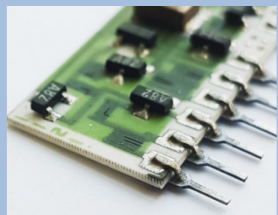
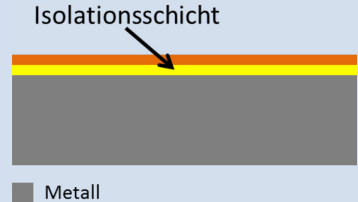
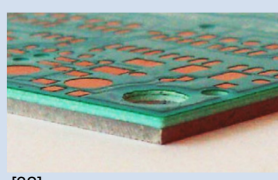
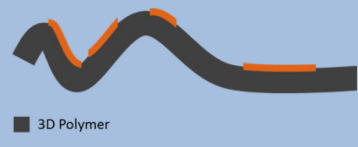
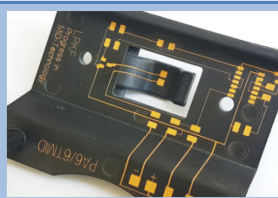


ABBILDUNG 2-1: GENERELLER AUFBAU EINER KLASSISCHEN LEITERPLATTE SOWIE FUNKTIONEN UND ANFORDERUNGEN AN DIE EINZELNEN KOMPONENTEN (NACH [30])

Technologischer Fortschritt und die Verfügbarkeit neuer Materialien gepaart mit steigenden Anforderungsprofilen haben dazu beigetragen, dass die Leiterplatte sich stetig verändert und weiterentwickelt. Je nach eingesetzter Materialart und dessen Beschaffenheit kann man verschiedene Arten von Leiterplatten unterscheiden. Am häufigsten wird nach wie vor die starre Leiterplatte bestehend aus einem starren Glasfaserverbund-Isolator und elektrisch leitfähigen Kupferlagen verwendet. In Tabelle 2-1 sollen einige typische Vertreter der aktuellen Entwicklungsiterationen der Leiterplatte dargestellt werden.

Arten von Leiterplatten

TABELLE 2-1: VERSCHIEDENE ARTEN VON LEITERPLATTEN UND SCHALTUNGSTRÄGERN

	Schematischer Aufbau	Beispiel	Bemerkungen
starre Leiterplatte	 <p> ■ Faserverbundplatte ■ Kupfer </p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ meistgenutzter LP-Typ ▪ viele Materialvarianten ▪ kosteneffizient
flexible Leiterplatte	 <p> ■ Polymerfolie </p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ kompakte und gewichtsminimierte Aufbauten ▪ z.B. Steckverbinder ▪ inzw. auch als flexibel und dehnbar [31] möglich
Starr-flex- Leiterplatte	 <p> Flex Starr </p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kombination aus starr und flex ▪ sichere Verbindung beider Materialien nötig
Semi-flex- Leiterplatte	 <p> dünnere Starr-Teil </p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alternative zu starr-flex ▪ dünner starr Bereich ▪ kein Polyimid erforderlich
keramische Schaltungsträger, LTCC, DCB	 <p> ■ Keramik </p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ temperaturstabil ▪ angepasster CTE; ▪ LTCC für Mehrlagenaufbau
Metallkern- Leiterplatte, IMS	 <p> Isolationsschicht Metall </p>	 <p>[32]</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ gute Kühleigenschaften ▪ mechanisch sehr stabil ▪ Leistungselektronik
3D geformte Leiterplatte, MID	 <p> ■ 3D Polymer </p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ hoch integrierte Systeme ▪ Substrat, Gehäuse und Verbindungen in einem

Alle hier dargestellten weiteren Varianten finden heutzutage dort Anwendung, wo eine klassische Leiterplatte nicht mehr ausreicht, um die geforderten Eigenschaften zu erfüllen. Ist zum Beispiel eine Baugruppe im Betrieb sehr hohen Temperaturbelastungen

Anwendungen und Kosten

ausgesetzt, bei welcher die Zuverlässigkeit der herkömmlichen Faserverbundstoffe nicht mehr gegeben ist, so kann auf ein thermisch beständigeres Material (z.B. Keramik) zurückgegriffen werden. Es gilt dabei zu beachten, dass alle hier vorgestellten Varianten zum Teil deutlich kostenintensiver sind als die klassische, starre Leiterplatte. So steigen die Kosten¹ für eine IMS-Platine etwa um das 1,5 bis 2-fache und für ein Flex-Produkt etwa um das 2 bis 5-fache gegenüber einer vergleichbaren Starr-Variante.

2.1.2 MATERIALIEN FÜR LEITERPLATTEN

Das elektrisch isolierende Substratmaterial ist der Hauptbestandteil eines Schaltungsträgers (Ausnahme: IMS). Die Materialart bestimmt maßgeblich die mechanischen, thermischen und dielektrischen Eigenschaften der späteren Baugruppe. Welches Basismaterial für ein Produkt zum Einsatz kommt, wird durch ökonomische Faktoren und die Anforderungsdefinition der jeweiligen Baugruppe bestimmt. Hierbei sind vor allem thermische Kriterien, wie Höhe und Dauer der Einsatztemperatur oder das Wärmemanagement von Leistungsverlusten, relevant. Flex-Materialien werden hingegen für besondere Konstruktionsanforderungen, wie z.B. der Anpassung an spezielle Gehäuseformen und für verformbare Zuleitungen genutzt. Weitere Kriterien sind: Isolationsfestigkeit, Frequenzverhalten und Zuverlässigkeit bei mechanischer Belastung. Neben zahlreichen organischen Trägermaterialien gibt es auch einige anorganische Materialtypen, wie z.B. Keramik- oder Metallkernsubstrate (IMS). Letztere sind mit einer zusätzlichen dielektrischen Schicht zwischen Träger und Verdrahtungsebene versehen. Eine Auswahl von verfügbaren Trägermaterialien ist zusammen mit ihren thermischen Parametern in Tabelle 2-2 dargestellt.

Verschiedene
Basismaterialtypen

¹ Basierend auf Onlinekalkulatoren von beta-layout und LeitOn für Prototypen

TABELLE 2-2: ÜBERSICHT ÜBER VERSCHIEDENE BASISMATERIALTYPEN NACH DATEN AUS [33], [34], [35], [36], [37], [38]

Typ	Harzmatrix / Grundmaterial	Gewebetyp	$T_G / ^\circ\text{C}$	$T_D / ^\circ\text{C}$	$\kappa / \text{W/m}\cdot\text{K}$
FR-2	Phenolharz	Cellulosepapier	50 bis 80	~ 200	0,2
FR-3	Epoxidharz	Cellulosepapier	~ 100	-	0,2
FR-4	Epoxidharz	Glasfasergewebe	125 bis 190	305 bis 360	0,25 bis 0,35
FR-4 (gefüllt)	Epoxidharz + Füllstoffe	Glasfasergewebe	125 bis 190	305 bis 360	1 bis 3
FR-5	Epoxidharz	Glasfasergewebe	175 bis 205	334 bis 344	0,35
CEM1	Epoxidharz	Cellulosepapier + Glasfasergewebe	85 bis 118	310	0,48 bis 1,8
CEM3	Epoxidharz	Glasfaservlies	95 bis 145	-	1,8
BT Epoxy	Bismaleimid Triazin (BT) modif. Epoxidharz	Glasfasergewebe	185	334	-
Polyimid	Polyimid	keine Gewebe o. Glasfasergewebe	220 bis 350	389 bis 577	0,24 bis 0,28
PTFE	PTFE	keine Gewebe o. Glasfasergewebe	200 bis 320	350	0,24
Keramik	Aluminiumoxid	-	-	-	14 bis 40
	Aluminiumnitrid	-	-	-	40 bis 260
IMS	Aluminium, Kupfer, Dielektrikum	-	-	-	236 380 0,3 bis 3

Für die Wahl des richtigen Basismaterialtyps sind die folgenden thermischen Parameter wichtig. Die Glasübergangstemperatur T_G bezeichnet eine definierte Temperatur, ab welcher das polymere Grundmaterial seine mechanischen Eigenschaften (E-Modul) sowie seinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) signifikant verändert. Die Zersetzungstemperatur T_D hingegen ist die Temperatur, ab welcher das Polymer beim Aufheizen 5 % seiner Masse verloren hat. (Abbildung 2-2) Wie gut das Basismaterial in der Lage ist, Wärme zu verteilen, wird durch die Wärmeleitfähigkeit κ bestimmt.

Thermische
Parameter

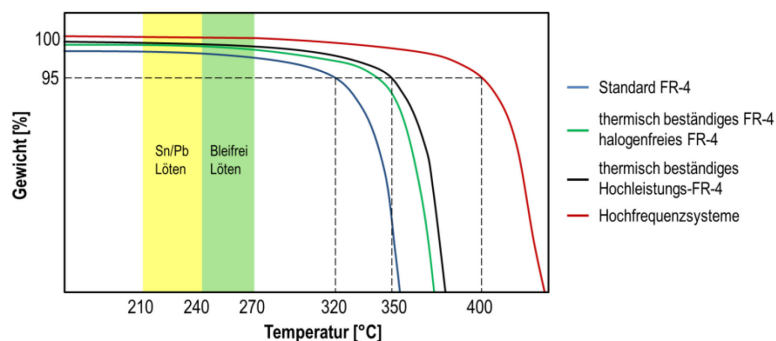


ABBILDUNG 2-2: EXEMPLARISCHE GEWICHTSVERLUSTE (TGA) VERSCHIEDENER BASISMATERIALTYPEN MIT EINER LAMINATDICKE VON 1,5 MM (NACH [39])

Bereits seit Jahrzehnten ist FR-4 das Standardmaterial in der Leiterplattenindustrie. Für die meisten Anwendungen bietet dieser Typ den besten Kompromiss aus niedrigen elektrischen Verlusten, hoher mechanischer Festigkeit, guter Dimensionsstabilität [34], thermischer Stabilität und geringen Kosten. Wird ein anspruchsvolles Wärmemanagement gefordert, ist FR-4 mit einer vergleichsweise schlechten Wärmeleitfähigkeit nur noch bedingt einsetzbar. Häufig verwendet man heute daher Material, dem wärmeleitende Füllstoffe (Keramikpartikel) beigemischt werden, wodurch sich die effektive Wärmeleitfähigkeit des Kompositwerkstoffes um bis zu einer Größenordnung erhöhen lässt. [40] Füllstoffe aus Silicat oder Talkum dienen vorrangig zum Absenken des Ausdehnungskoeffizienten. [41]

Standard FR-4

Neben dem standardmäßigen Epoxid werden auch Matrizen aus Polyimid, PTFE, PEEK sowie LCP Werkstoffe eingesetzt. Diese werden jedoch nur bei thermisch oder mechanisch anspruchsvollen Anforderungen an die Baugruppe verwendet, da sie deutlich preisintensiver sind als der Standard. Auch für Anwendung der Hochfrequenz(HF)-Technik sind diese Materialien auf Grund ihrer geringeren Permittivität und höheren Kriechstromfestigkeit [34] den Epoxidmaterialien vorzuziehen. Eine Kompromisslösung stellen sogenannte hybride Leiterplatten dar, bei welchen nur einzelne Lagen aus Keramik oder Teflon [42] bestehen. Im kostensensitiven Bereich der Haushaltsgeräte sind hingegen CEM oder FR-2-Materialien zu finden.

Alternativen zu FR-4

Aktuelle Forschungsarbeiten der letzten Jahre befassen sich mit einer möglichen Substitution der teuren Polymere, zum Beispiel durch Polyurethan als Flex-Material für die Textilelektronik [31] oder durch ökologische Biopolymere [43]. In [41] wird ein Harzsystem auf Basis von Benzoaxin als Alternative für Epoxidsysteme vorgestellt. Für Leiterplatten aus diesem Stoff wird ein T_G von 200 °C angegeben.

Neue Entwicklungen

Bei den praktischen Untersuchungen in dieser Arbeit soll sich hauptsächlich auf Material vom Typ FR-4 auf Epoxidharzbasis beschränkt werden. Es wird neben dem Standard- T_G (130 °C bis 150 °C) auch Hoch- T_G (> 150 °C) Material genutzt, um die thermischen Prozesse abzubilden und zu untersuchen. Auf Grund hoher Kosten und eingeschränkter Verfügbarkeit konnte nur vereinzelt auf thermisch stabileres Material vom Typ Polyimid zurückgegriffen werden.

Basismaterial in dieser Arbeit

2.1.2.1 EPOXIDHARZ-GLASFASER-KERNMATERIAL UND PREPREGS

Das Basismaterial, also der Rohling für eine Leiterplatte, besteht aus einem Dielektrikum-Laminat und einer elektrisch leitfähigen Schicht auf einer oder beiden Seiten des Stoffes. Die Laminatwerkstoffe für elektrische Schaltungsträger werden in der IPC-Norm 4104 [44] spezifiziert. Als Grundmatrix der Lamine dienen Polymere, meist auf

Aufbau von Faser-verbund Substraten

Epoxidharzbasis, welche mit Geweben aus Glasfasern durchzogen sind (früher häufig Phenolharz mit Papiermatten). In Abbildung 2-3 ist am Beispiel eines Querschliffes der Aufbau von typischen Epoxid-Glasfaser-Laminates zu erkennen.

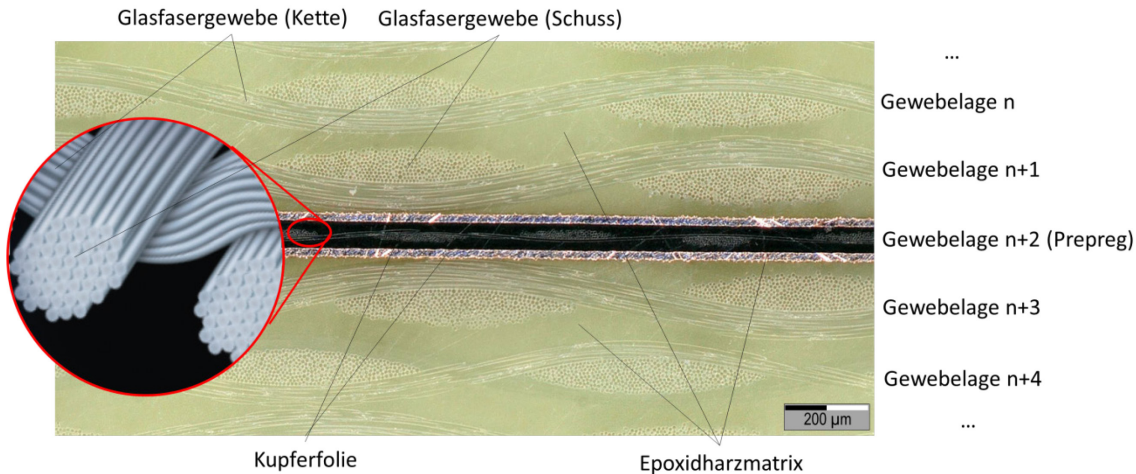


ABBILDUNG 2-3: QUERSCHLIFF VON ZWEI 1,5 MM DICKEN FR-4-LAGEN (MIT KUPFER) WELCHE MIT EINEM 106ER PREPREG VERPRESST WURDEN (GLASFASER-VERGRÖßERUNG AUS [34])

Das Gewebe hat die Aufgabe, die Harzmatrix aufzunehmen und somit die mechanische Stabilität der Leiterplatte zu verstärken. Hierfür können Gewebe oder Vliese aus Papier, Baumwolle, Aramid, PI oder PTFE zum Einsatz kommen. [34] Die häufigste Stoffklasse im Bereich der industriellen Leiterplattentechnik sind aber Glasfasergewebe. Je nach Einsatzgebiet unterscheidet man Glasarten in E- (Standard), NE- (HF-Technik) und T- (niedriger CTE) Glas. [45] In der x-y-Ebene eines Basismaterials bestimmen die Glasfaserlagen den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Verbundes. Somit hat ein Überschreiten des T_g nur eine leichte Änderung des CTE in x- und y-Richtung zur Folge. Das Weben der Matten erfolgt, wie in Abbildung 2-3 zu sehen, gleichmäßig wechselnd, in vertikaler (Kette) und horizontaler (Schuss) Richtung. Unterteilt werden die verschiedenen Gewebe nach Fadenzahl und Garnstärke, was Einfluss auf die spätere Dicke des Verbundes hat. In Tabelle 2-3 sind einige typische Gewebesorten aufgeführt.

Glasfasergewebe

TABELLE 2-3: AUSWAHL VERSCHIEDENER GEWEBETYPEN [34]

		Kette		Schuss	
Typ	Flächenge- wicht / g/mm ²	Fadenzahl / pro cm	Filamentdi- cke / µm	Fadenzahl / pro cm	Filamentdi- cke / µm
106	25	22	5	22	5
1080	47	24	5	20	5
2125	88	16	7	15	6
2116	107	24	7	23	7
7628	212	17	9	14	9

Harzsysteme auf Epoxidbasis sind das am häufigsten genutzte Matrixmaterial für die Herstellung von Leiterplatten-Basismaterialien. Diese Harze besitzen gute mechanische Eigenschaften mit Festigkeits- und Steifigkeitswerten bis in den Bereich legierter Stähle. [46] Hinzu kommen gute thermische und dielektrische Eigenschaften sowie eine hohe chemische Beständigkeit. [47] Eine der verbreitetsten Epoxidharzgruppen wird durch die in Abbildung 2-4 dargestellte Reaktion von Bisphenol A mit Epichlorhydrin gebildet. Da Epoxidharze allein keine filmbildenden Eigenschaften haben, beruht ihre Umsetzung auf der Polyadditionsreaktion mit anderen Verbindungen. [47] Der Mechanismus dieser Reaktion wird zum Beispiel in [46] detaillierter beschrieben.

Epoxid-Harzsystem

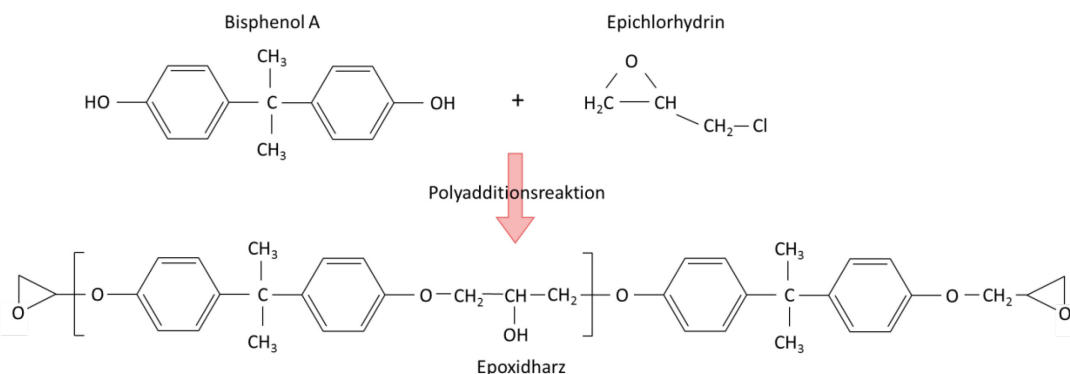


ABBILDUNG 2-4: REAKTIONSMECHANISMUS DER EPOXIDHARZSYNTHESE MITTELS BISPHENOL A (NACH [47])

Die Art, wie die jeweiligen Epoxide polymerisieren und wie sie beschaffen sind, hängen sowohl von der Härtungstemperatur wie auch der Zeit, über welche ein Harz diesen ausgesetzt wird, ab. Diese Abhängigkeiten müssen für ein Harzsystem bekannt sein, um aus ihnen die entsprechenden Fertigungsparameter ableiten zu können. Veranschaulichen lassen sich diese Zustände in einem TTT- (Time-Temperature-Transition) Diagramm, wie es Abbildung 2-5 exemplarisch für ein Epoxidharz zeigt. Eine horizontale Gerade im Diagramm würde hier eine isotherme Härtung repräsentieren.

Aushärtecharakteristik von Epoxiden

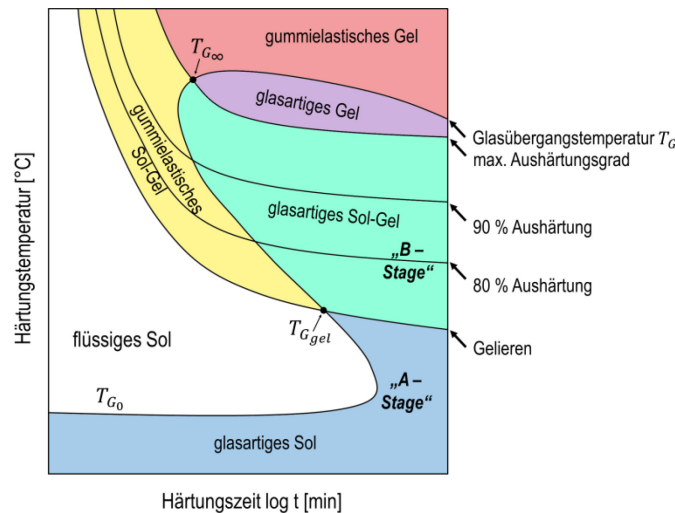


ABBILDUNG 2-5: ALLGEMEINES TTT-DIAGRAMM MIT DEN PHASEN BEI DER HÄRTUNG EINES EPOXID-HARZSYSTEMS (NACH [48])

Die verschiedenen morphologischen Phasen die ein Harzsystem bei der Härtung durchläuft sind nach [48]:

- Sol: vollständig in Lösungsmittel lösliches, nur wenig gehärtetes Produkt,
- Sol-Gel: Mischung aus unlöslichen Anteilen,
- Gel: vollständig unlöslicher Formstoff (vollständig ausgehärtet).

Ein neuer Ansatz aus Harz und Härter besitzt zunächst eine Glasübergangstemperatur T_{G_0} (z.B. -40 °C [15]), unterhalb welcher keine Reaktion stattfindet. Zwischen T_{G_0} und $T_{G_{gel}}$ härtet das System nur minimal. Bei der Lagerung eines Systems innerhalb dieses Temperaturbereiches wird es wieder fest (verglasst). Diesen „A-Stage“ Zustand nutzt man bei Prepreg-Materialien aus, um sie zu einem späteren Zeitpunkt weiter zu verarbeiten. [48] Überschreitet die Temperatur dann den Gelierungspunkt ($T_{G_{gel}}$), setzt die chemische Reaktion zur Vernetzung ein. Hierbei bildet sich zunächst ein gummiartiges und später dann ein glasartiges Sol-Gel-Gemisch („B-Stage“). $T_{G_{\infty}}$ stellt die höchstmögliche Glasübergangstemperatur eines vollständig vernetzten Harzsystems dar. Wird das System lange Zeit hohen Temperaturen ausgesetzt, tritt eine thermische Schädigung ein [48], was man am Abfall der Verglasungslinie im Diagramm erkennt.

Mit einem durchschnittlichen T_G um die 150 °C besitzt das Standard-Epoxidharz nur eine limitierte Langzeit-Temperaturstabilität. Mit einigen Hochleistungs-Epoxidharzen (Hoch- T_G) lassen sich aber auch Einsatztemperaturen bis zu 175 °C erreichen. Die Glasübergangstemperatur des Epoxidharzes beeinflusst vor allem die Alterung des Basismaterials und dessen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Große Bedeutung hat dies für die Wärmedehnung von Basismaterialien in der z-Achse (orthogonal zur Ebene der Glasfaserlagen). Beispielsweise verändert sich beim Basismaterialtyp IS410

Glasübergangstemperatur bei Leiterplatten

ab T_G der CTE in z-Richtung von $55 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$ auf $250 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$. [49] Diese thermisch induzierte Ausdehnungsänderung über einen längeren Zeitraum ist häufig Ursache für Schäden in der Leiterplatte und elektrische Fehler, wie beispielsweise Risse in Laminaten oder in Durchkontaktierungen. Eine kurzzeitige Überschreitung des T_G , wie zum Beispiel bei Lötprozessen, kann von den meisten Basismaterialien verkraftet werden.

Bei der Verarbeitung von Trägersubstraten auf organischer Basis werden in der Regel Klebe- und Laminierprozesse eingesetzt. Eine grafische Darstellung des Herstellungsablaufes lässt sich Abbildung 2-6 entnehmen. Zunächst wird das aufgerollte Glasfasergewebe durch ein Reservoir mit flüssigem Harz gezogen und anschließend getrocknet. Im nächsten Schritt wird es geschnitten und zusammen mit Kupferfolien unter Temperatur zu Tafeln (typ. Größe: $(1020 \times 1220) \text{ mm}^2$ [50]) verpresst. Die Dicke des so entstandenen Basismaterials wird durch die Anzahl der verwendeten Prepreg-Lagen sowie durch deren Gewebeart bestimmt.

Herstellung von
Basismaterial

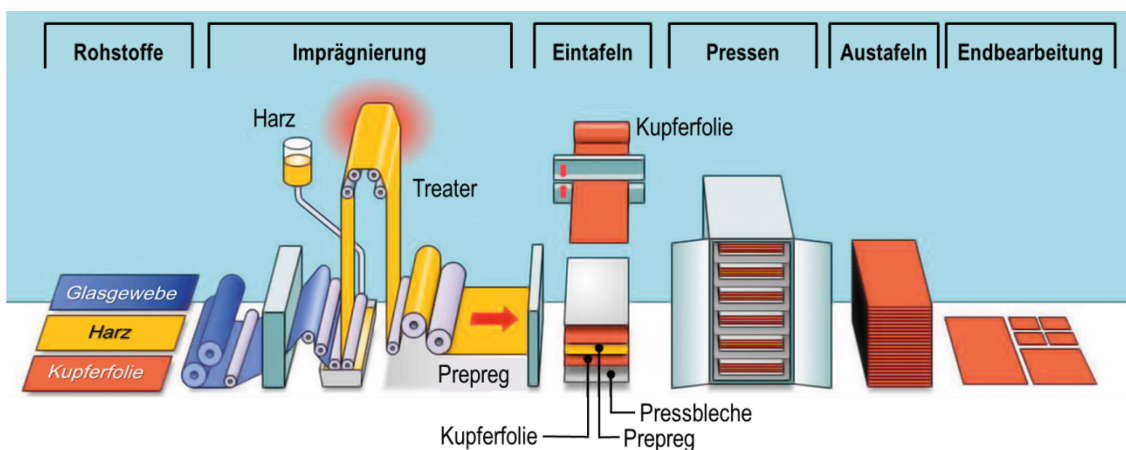


ABBILDUNG 2-6: MATERIALIEN UND VERFAHRENSSCHRITTE DER BASISMATERIALHERSTELLUNG [34]

In dem harzgetränkten Glasgewebe findet bei der ersten Wärmebehandlung (Treater) eine Teilpolymerisation statt. Das so entstandene „Prepreg“ (pre-impregnated) muss einen weiteren Temperaturprozess durchlaufen, um vollständig zu polymerisieren. Neben der direkten Weiterverarbeitung zum Basismaterial besteht somit auch die Option, das Prepreg dem laufenden Prozess zu entnehmen. Unter Zufuhr von Temperatur und Druck kann das Harz zu einem späteren Zeitpunkt erneut weich werden und zwei Kernmateriallagen oder eine Kernlage und eine Folie formschlüssig miteinander verbinden. Verschiedene Dicken lassen sich durch die Kombination verschiedener Gewebetypen erzielen. In Tabelle 2-4 sind einige typische Prepreg-Sorten mit ihrer resultierenden Pressdicke aufgeführt. Auf Grund der vorliegenden Teilpolymerisation haben Prepreg-Materialien relativ kurze Standzeiten. Laut [51] bleiben die Prepreg-

Prepregs

Eigenschaften für eine Lagerung bei 5 °C für einen Zeitraum von 6 Monaten und 3 Monate für eine Lagerung bei 23 °C stabil. Weitere Infos zur Presstechnologie finden sich in Abschnitt 2.1.3.2

TABELLE 2-4: AUSWAHL VERSCHIEDENER PREPREG-TYPEN UND DEREN DICKE NACH DEM VERPRESSEN [52]

Typ	Harzgehalt vor Verpressen / %	Harzgehalt nach Verpressen / %	Dicke nach Verpressen / μm
106	70 – 76	35 – 43	33 – 43
1080	59 – 65	34 – 42	64 – 74
2125	50 – 56	33 – 41	94 – 104
2116	47 – 53	32 – 40	95 – 105
7628	42 – 48	31 – 39	173 – 183

Infolge der Temperatur- und Druckeinwirkung während des Pressvorganges wird das Harz im Prepreg weich und es beginnt zu fließen. Für die Herstellung von Multilayer-Leiterplatten ist die Fließfähigkeit des Harzsystems notwendig, um eine vollständige und stoffschlüssige Füllung der unregelmäßigen Oberflächen-Strukturen (z.B. Kupferleiter) zweier Lagen zu erreichen. Einige Anwendungen erfordern hingegen den Einsatz sogenannter Low-Flow- bzw. No-Flow-Prepregs, deren Flussrate gegenüber Standard-Prepregs deutlich reduziert ist. Erreicht wird dies vor allem durch eine bis zu zwei Größenordnungen höhere Viskosität des Harzsystems durch die Zugabe von molekular hochgewichtigen Additiven, die den Fluss behindern. [53]

Fließverhalten

2.1.2.2 LEITERMATERIALIEN, KUPFERFOLIEN UND OBERFLÄCHEN-METALLISIERUNGEN

Der industriell am häufigsten eingesetzte Leitwerkstoff ist Kupfer. Kupfer besitzt nach Silber die größte elektrische Leitfähigkeit von Reinformen. Aufgrund seiner Verfügbarkeit ist Kupfer aber deutlich weniger preisintensiv als Silber, was es zu einem der wichtigsten Grundwerkstoffe in der Elektroniktechnologie macht. Dennoch werden sowohl Silber als auch Gold, welches ebenfalls eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweist, für spezielle Anwendungen in der Elektronik, wie zum Beispiel beim Drahtbonden [54], eingesetzt. Als wirtschaftlich relevantes Material für Leitwerkstoffe bleibt neben Kupfer noch Aluminium. In den letzten Jahren gibt es vermehrt Bestrebungen, Kupfer in der Elektronik stellenweise durch Aluminium zu substituieren. [55], [56] Vorteilhaft ist hierbei, neben dem geringeren Preis, die um ca. 70 % geringere Dichte von Aluminium gegenüber Kupfer. Daher ist dessen Einsatz vor allem für Leichtbau und Systeme mit begrenztem Gewicht interessant. In Tabelle 2-5 sind die wichtigsten Metalle der Elektronikindustrie mit ihrem elektrischen Leitwert angegeben.

Leitwerkstoffe

TABELLE 2-5: FÜR DIE ELEKTRONIK RELEVANTE REINMETALLE MIT ELEKTRISCHER UND THERMISCHER LEITFÄHIGKEIT SOWIE PREIS [36]

	Spezifischer Leitwert σ / 10^6 S/m ^{II}	Wärmeleitfähigkeit κ / $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ^{II}	Anwendungen [57]	Preis je kg / € ^{III}
Ag - Silber	62	430	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohlleiter ▪ Dünn- und Dickschichtschaltungen 	409,74
Cu - Kupfer	54 - 60	380 [58], 400	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kabel ▪ Freileitungen ▪ Integrierte Schaltkreise (IC's) ▪ Dünnschichtschaltungen ▪ Leiterplatten 	5,46
Au - Gold	46	314 [58], 320	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integrierte Schaltkreise (IC's) ▪ Dünn- und Dickschichtschaltungen 	33.620,60
Al - Aluminium	34 - 38	235	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kabel ▪ Freileitungen ▪ Integrierte Schaltkreise (IC's) ▪ Dünnschichtschaltungen 	1,94
Ni - Nickel	15	91	▪ Leiterplatten	11,05
Fe - Eisen	10	80	▪ Freileitungen (Al/Stahl)	5,84 ^{IV}
Sn - Zinn	8,7	66,6	▪ Leiterplatten	16,46

Grundlegend lässt sich der Mechanismus zur elektrischen Leitfähigkeit nach der jeweiligen Bindungsart in Ionen- und Elektronenleitung unterscheiden. Die Leitfähigkeit metallischer sowie polymerleitender Werkstoffe beruht auf der Elektronenleitung. In Halbleiter-Werkstoffen kommen Defektelektronen hinzu. [36] Im Festkörper sind die Atome in einem Kristallgitter in einer dichten Packung angeordnet, wodurch sich die Anziehungskräfte zwischen einem Elektron und zwei benachbarten Atomkernen aufheben können. Hierdurch werden die Elektronen zu „freien“ Valenzelektronen, welche mit einer Konzentration von $10^{22} \dots 10^{23}$ Elektronen/cm³ im Elektronengas [59] vorliegen. Wird durch das Anlegen einer Spannung ein elektrisches Feld in dem Festkörper aufgebaut, so werden die freien Elektronen von der positiven Elektrode angezogen und es entsteht ein elektrischer Strom. Hierfür gilt die vektorielle Form des ohmschen Gesetzes:

Elektrische
Leitfähigkeit und
ohmsches Gesetz

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

mit der lokalen Stromdichte J , der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit σ und der elektrischen Feldstärke E . Die Leitfähigkeit ist materialabhängig und bei Metallen ein Maß für die Anzahl und Beweglichkeit der freien Elektronen. Geht man von einem isotropen Material aus, so kann für σ ein skalarer Wert angenommen werden. Nimmt man außerdem an, dass in dem vom Strom I durchflossenen Körper konstante Bedingun-

^{II} Periodensystem von www.webelements.com; Werte bei 20 °C

^{III} Rohstoffpreise laut www.boerse-online.de; Kurszeit: 03.10.2018

^{IV} Eisenerzpreis 58,42 €/DMTU (1 Dry Metric Ton Eisenerz enthält 1% Eisen)

gen vorliegen (z.B. Temperatur) [60], so lässt sich für (Gl. 2-1) die vereinfachte Form als

$$U = R \cdot I \quad (\text{Gl. 2-2})$$

mit der über einen elektrischen Widerstand R abfallenden elektrischen Spannung U verwenden.

Neben der elektrischen Leitfähigkeit sind in Tabelle 2-5 auch Werte für die thermische Leitfähigkeit κ angegeben. Zu erkennen ist hier, dass das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit für alle Metalle annähernd denselben Wert annimmt. Bereits 1853 von Wiedemann und Franz [61] entdeckt, beruht dieser Zusammenhang auf den freien Elektronen im Metall. Diese stehen sowohl als Träger von elektrischer Ladung wie auch als Träger der thermischen Energie zur Verfügung. Später stellte Lorenz [62] fest, dass dieses Verhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur einen nahezu linearen Verlauf beschreibt. Es gilt

Zusammenhang
thermischer und
elektrischer
Leitfähigkeit

$$\frac{\kappa}{\sigma} = L \cdot T \quad (\text{Gl. 2-3})$$

mit der Temperatur T in Kelvin und der Lorenzzahl L ($L_{\text{theor.}} = 2,45 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W} \cdot \Omega}{\text{K}}$ [63]).

Der Widerstandswert einer einfachen Geometrie, z.B. von einem rechteckigen Leiterzug oder rundem Draht, lässt sich für einen homogenen Körper der Länge l mit einem gleichförmigen Querschnitt A nach

Widerstandswert

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A} \quad (\text{Gl. 2-4})$$

berechnen.

Die Elektronenkonzentration ne^- ist in Metallen nahezu konstant und nicht von der Temperatur abhängig. Allerdings wird die Beweglichkeit der Elektronen μ_e , neben Reinheit, Verformungsgrad und Legierungstyp eines Stoffes, durch dessen Temperatur beeinflusst. [36] Für die spezifische elektrische Leitfähigkeit und deren Kehrwert, den spezifischen elektrischen Widerstand ρ , gilt

Einfluss von Temperatur auf elektrische Leitfähigkeit von Metallen

$$\sigma = e_0 \cdot ne^- \cdot \mu_e = \frac{1}{\rho} \quad (\text{Gl. 2-5})$$

mit der Elementarladung e_0 . Wird die Temperatur eines metallischen Leitwerkstoffes erhöht, schwingen die Atome verstärkt um ihre Ruhelage. Statistisch gleicht dies einer Vergrößerung der Atomdurchmesser, was zu vermehrten Stößen mit den freien Elektronen führt. (Abbildung 2-7)

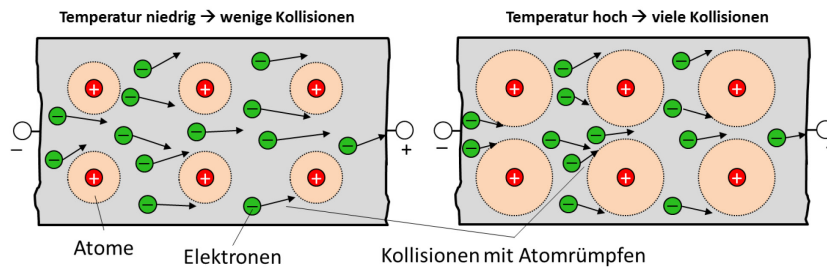


ABBILDUNG 2-7: TEMPERATUREINFLUSS AUF DEN ELEKTRISCHEN WIDERSTAND INFOLGE VON KOLLISIONEN IM KRISTALLGITTER

Die Folge dieser Stoßprozesse ist eine verminderte Leitfähigkeit und damit ein Anstieg des elektrischen Widerstandes im Werkstoff. Materialien, welche dieses Verhalten aufweisen, bezeichnet man als Kaltleiter oder „PTC“-Leiter (positive temperature coefficient). Vorrangig findet man dieses Verhalten bei metallischen Leitern.

PTC-Leiter

Während die Ladungsträgerdichte im Metall fest vorgegeben ist, müssen diese in anderen Stoffen erst generiert werden. Dies weist eine starke Temperaturabhängigkeit auf. [64] Hierbei werden die Ladungsträger infolge einer thermischen Energiezufuhr aus dem gebundenen Zustand in einen beweglichen Zustand angehoben. (Abbildung 2-8) Typisch ist dieses Verhalten bei Halbleiter-Werkstoffen. Zwar sorgt eine höhere Temperatur hier auch für vermehrte Stoßprozesse, allerdings ist die Abhängigkeit der Ladungsträgerdichte viel stärker. Da hier der elektrische Widerstand mit Zunahme der Temperatur sinkt, spricht man von einem Heißleiter oder „NTC“-Leiter (negative temperature coefficient).

NTC-Leiter

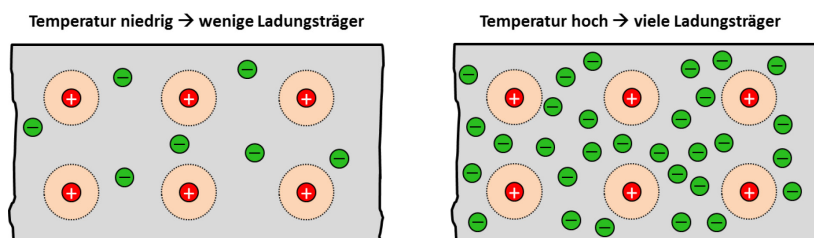


ABBILDUNG 2-8: WIDERSTANDSVERRINGERUNG BEI STEIGENDER TEMPERATUR DURCH LADUNGSTRÄGERFREISETZUNG

Analytisch lässt sich die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes mit entsprechenden Temperaturkoeffizienten in einer Taylor-Reihe n-ter Ordnung beschreiben. [65] Für die meisten technischen Anwendungen nutzt man bei metallischen Werkstoffen in einem begrenzten Temperaturbereich (200 K ... 400 K [66]), hingegen die vereinfachte Form mit der linearen Abhängigkeit nach

Temperaturkoeffizienten

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] . \quad (\text{Gl. 2-6})$$

Der Temperaturkoeffizient α beschreibt also die prozentuale Änderung des Widerstands je Grad Temperaturänderung. [60] Es ist zu beachten, dass α ebenfalls temperaturabhängig ist, wodurch sich die Steigung der Kurve $\rho(T)$ ändert. In Tabelle 2-6 sind einige Temperaturkoeffizienten für ausgewählte Materialien dargestellt. Für viele Anwendungen wird eine möglichst geringe Temperaturabhängigkeit der elektrischen Größen gefordert, z.B. für Heizleiter und Festwiderstände. Hierfür stehen Legierungen mit speziell angepassten Temperaturkoeffizienten zur Verfügung. (s. Tabelle 2-6)

TABELLE 2-6: TEMPERATURKOEFFIZIENTEN FÜR EINIGE AUSGEWÄHLTE METALLE UND LEGIERUNGEN [66], [67]

	Temperaturkoeffizient $\alpha / 10^{-3}/K$	Anwendung		Temperaturkoeffizient $\alpha / 10^{-3}/K$	Anwendung
Ag - Silber	3,7 (20 °C)	▪ Dünnschicht	Kohle	-0,15 ... -1,5 (20 °C ... 70 °C)	▪ Kohleschicht-Festwiderstand
Cu - Kupfer	3,9 (20 °C)	▪ Leitungen	NiCr8020 (Chromnickel)	0,05 ... 0,15 (20 °C ... 105 °C)	▪ Heizleiter ▪ Hochohmige Widerstände
Ni - Nickel	6,1 ... 6,24 (20 °C ... 105 °C)	▪ Widerstandsthermometer	CuNi44 (Konstantan)	-0,08 ... 0,04 (20 °C ... 105 °C)	▪ Messwiderstände ▪ Potentiometer

Für NTC-Materialien, wie z.B. Halbleiter (dotierte Oxide, leitfähige Polymere,...) gilt (Gl. 2-6) in der Regel nicht. Die Leitfähigkeit im Stoff ist hier vorrangig von der Hopping-Leitung bzw. dem Tunneleffekt abhängig. So können z.B. in leitfähigen Polymerstoffen thermisch angeregte Elektronen leichter die Grenze zwischen zwei leitfähigen Partikeln überwinden. [68] Für die Bestimmung des temperaturabhängigen Widerstandes $R(T)$ eines Heizleiters gilt näherungsweise:

$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Den Quotienten aus Aktivierungsenergie E_A und Boltzmann-Konstante k_B findet man häufig in Datenblättern als NTC-Konstante B_{NTC} . [69] Eine genauere Berechnung lässt sich über die Steinhart-Hart-Gleichung [69] erreichen, für deren Lösung jedoch mindestens drei spezifische Koeffizienten notwendig sind. Für leitfähige Polymerstoffe sind diese Gleichungen aber häufig nicht anwendbar, da hier verschiedene NTC- und PTC-Prozesse simultan ablaufen und sich gegenseitig überlagern. [68]

Im Technologiebereich von organischen Leiterplatten werden fast ausnahmslos Kupferfolien verwendet. Die möglichen Foliendicken liegen hierbei zwischen 5 μm bis 210 μm , wobei 18 μm , 35 μm und 70 μm die am häufigsten zu findenden Kupferstärken bilden. Die hierzu verwendeten Kupferfolien besitzen unterschiedliche Ei-

Kupferfolien für
Leiterplatten

genschaften auf ihren zwei Seiten. Die planare Seite, welche später auch auf der Leiterplatte zu sehen ist, muss nasschemisch bearbeitbar sowie kontaktier- und lötbar sein. Die dem Leiterplattenkern zugewandte Seite wird mittels eines sogenannten Treatmentprozesses angeraut und dient damit der besseren Haftung auf dem organischen Substrat. Während des Treatmentprozesses entstehen durch abwechselndes Aufbringen und Verfestigen von Kupfer eine dendritische und sphärische Oberfläche. Diese zeichnet sich durch hochdichte und gleichmäßig verteilte Mikrostrukturen (Abbildung 2-9) aus und man erzielt dadurch eine optimale Haftung zum Leiterplattenmaterial.

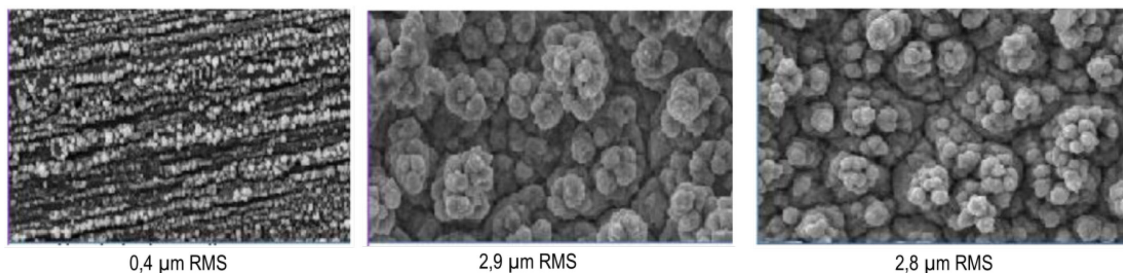


ABBILDUNG 2-9: REM-AUFNAHMEN VERSCHIEDENER TREATMENTSCHICHTEN MIT QUADRATISCHER MITTLERER RAUTIEFE (RMS) [70]

Bringt man zwei leitfähige Körper in physischen und elektrischen Kontakt, dann entsteht an den Grenzflächen ein Kontakt- oder Übergangswiderstand. Die Ursache hierfür sind Rauigkeiten in der Oberflächenbeschaffenheit jedes realen Materials. Hierdurch reduziert sich die tragende Kontaktfläche am Übergang. Häufig sind die Oberflächen unedler Metalle zudem mit einer Fremdschicht (z.B. Oxid) überzogen, welche einen zusätzlichen Widerstand darstellt. Bei einer ausreichenden Anpresskraft am Übergang kann die Fremdschicht durch eine plastische Verformung in angrenzende Bereiche verdrängt werden und es entsteht die wirksame Kontaktfläche.

Übergangswiderstand an Kontaktflächen

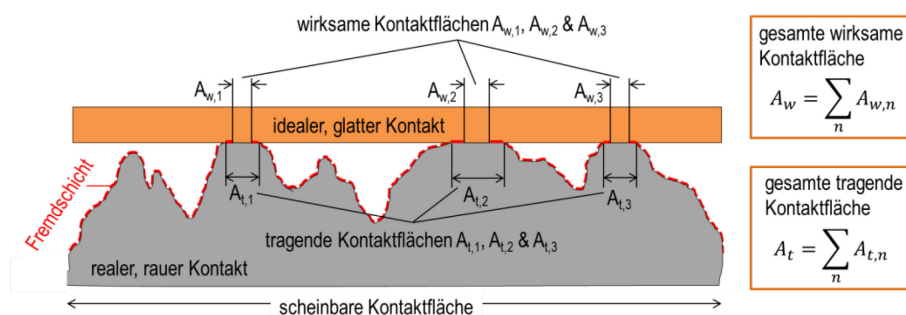
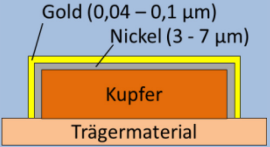
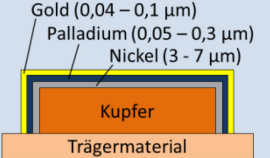
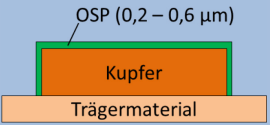
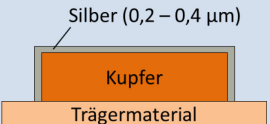
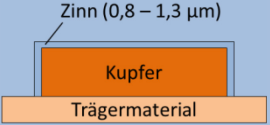
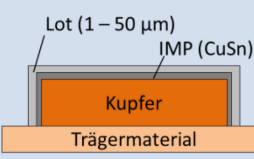


ABBILDUNG 2-10: DARSTELLUNG EINES KONTAKTES ZWISCHEN EINER RAUEN UND EINER IDEAL GLATTEN KONTAKTFLÄCHE (NACH [15])

Eine wichtige Eigenschaft für einen auf Leiterplatten verwendeten Leitwerkstoff ist dessen chemisches Verhalten der Oberfläche. Längere Standzeiten oder erhöhte Temperaturen können beispielsweise auf blanken Kupferoberflächen Fremdschichten durch Korrosion hervorrufen. Zum Beispiel wächst eine Kupferoxidschicht nach 90 Tagen bei Raumtemperatur auf eine Dicke von ca. 10 nm. [71] Eine Erhöhung der Temperatur beschleunigt den Wachstumsprozess. Durch eine Oxidschicht auf der Oberfläche eines Fügepartners wird zum Beispiel die Herstellung von stoffschlüssigen Verbindungen auf Basis einer chemischen Bindung, wie es beim Löten erfolgt, behindert. [35] Daher kommen in der Aufbau- und Verbindungstechnik verschiedene Oberflächenbeschichtungen zum Einsatz, welche die korrosionsanfälligen metallischen Bereiche einer Leiterplatte oder Baugruppe, die der Atmosphäre ausgesetzt sind, schützen. Eine Übersicht der gängigen Oberflächenbeschichtungen auf Leiterplatten zeigt Tabelle 2-7. In [72] lässt sich anhand einer vorgestellten Analyse der Marktanteile der verschiedenen Oberflächen erkennen, dass ENIG-Beschichtungen den deutlich größten Anteil im gesamten Leiterplattenmarkt einnehmen.

TABELLE 2-7: ÜBERSICHT VON OBERFLÄCHENSCHUTZSCHICHTEN AUF KUPFERLEITERN VON LEITERPLATTEN [73], [74], [75]

Oberfläche	Beschreibung	Aufbau	Merkmale
ENIG – Electroless Nickel/Immersion Gold	<ul style="list-style-type: none"> Gold löst sich im Lot Nickel als Diffusions-sperre 		<ul style="list-style-type: none"> Kombination von Löten und Bonden gute Planarität lange Standzeit teuer „Black Pad“ Risiko
ENEPIG – Electroless Nickel/Electroless Palladium/Immersion Gold	<ul style="list-style-type: none"> Gold und Palladium löst sich im Lot Gold nicht in Kontakt mit Nickel Nickel als Diffusions-sperre 		<ul style="list-style-type: none"> Kombination von Löten und Bonden gute Planarität Gefahr durch „Black Pad“ Effekt reduziert sehr lange Standzeit sehr teuer
OSP – Organic Surface Passivation	<ul style="list-style-type: none"> organische Schutz-schicht 		<ul style="list-style-type: none"> geringste Kosten im Vergleich zu anderen Oberflächen geringe Beständigkeit
ImAg – Immersion Silber	<ul style="list-style-type: none"> chemischer Austausch der oberen Cu-Schicht durch Silber 		<ul style="list-style-type: none"> gute Lötbarkeit begrenzte Standzeit empfindlich gegen Chlor und Schwefel Umgebung
ImSn – Immersion Zinn	<ul style="list-style-type: none"> chemischer Austausch der oberen Cu-Schicht durch Zinn 		<ul style="list-style-type: none"> gute Planarität IMP Wachstum muss kontrolliert werden

HASL – Hot Air Solder Leveling	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eintauchen der Platine in geschmolzenes Lotmaterial ▪ anschließendes Wegblasen und Glätten der Oberfläche mit heißer Luft 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ geringe Kosten ▪ einfach durchzuführen ▪ gute Lötbarkeit ▪ thermische Belastung der LP ▪ mittlere Planarität
--	--	---	--

In dieser Arbeit wurden vorrangig blanke Kupferoberflächen auf den Testleiterplatten verwendet. In Kombination mit einigen der hier untersuchten Heizschichtmaterialien wäre ein zusätzlicher Metallisierungsschritt nicht möglich gewesen. Jedoch mussten einige Demonstratorbaugruppen mit einer NiAu-Beschichtung versehen werden, da diese bei erhöhten Temperaturen getempert werden sollten und eine weiterhin gute Lötbarkeit benötigt wurde.

Oberflächen von
Testleiterplatten

2.1.3 FERTIGUNGSVERFAHREN BEI DER PRODUKTION VON LEITERPLATTEN

An dieser Stelle sollen die gängigen Fertigungsverfahren, welche standardmäßig Einsatz in der Produktion von Leiterplatten finden, erläutert werden. Vor allem wird hierbei auf Standardprozesse eingegangen, welche während der praktischen Bearbeitung des Themas angewendet wurden. Ausführliche Beschreibungen der gesamten Prozesskette finden sich zum Beispiel in [34], [52], [35], [76] und [77], wovon hier insbesondere temperaturabhängige Prozesse dargelegt werden. Hierbei soll sich primär auf die Technologie der starren organischen Leiterplatte fokussiert werden. Sowohl die Notwendigkeit der Integration einer Heizschicht in die Leiterplatte als auch die Einbindung der neuen Technologie in den Fertigungsablauf von Platinen machen diesen Abschnitt erforderlich. Es muss beachtet werden, dass die hier beschriebenen Fertigungsschritte nur die Fertigung der eigentlichen Leiterplatte umfassen. Die Abläufe zur Herstellung einer gesamten Baugruppe (z.B. Druck- und Fügeprozesse) werden in Abschnitt 2.2 behandelt.

Allgemeines zum
Abschnitt

An dieser Stelle wird es als sinnvoll erachtet, zwischen der Fertigung von ein- bzw. doppel- und mehrlagigen Leiterplatten (ML = Multilayer) zu unterscheiden. Obwohl sich die strukturgebenden Prozesse beider Platinenvarianten kaum unterscheiden, erfordern Multilayer den Einsatz zusätzlicher Laminierprozesse. Dieses Verfahren bildet die Grundlage für weiteres Einlaminieren und Einbetten, worauf die hier untersuchte Heizsystemintegration beruht. Ein- oder doppelseitige Leiterplatten werden verwendet, wenn die Bauteil- und Verdrahtungsdichten der Leiterplatte gering im Verhältnis zur Platinengröße sind. Ein Großteil der industriell gefertigten Leiterplatten wird als Mul-

Unterscheidung Ein-
und Mehrlagen

tilayer produziert, um die Platinengröße möglichst effizient zu nutzen und die Außenlagen weitestgehend der Bauelementmontage zur Verfügung zu stellen.

2.1.3.1 EIN- UND DOPPELSEITIGE LEITERPLATTEN

Mit einem Rohzuschnitt des in 2.1.2 vorgestellten Basismaterials beginnt die Platinenfertigung beim Leiterplattenhersteller. Die grundlegenden Prozessschritte werden in Abbildung 2-11 veranschaulicht.

Fertigungsablauf

Zunächst erfolgt die mechanische Bearbeitung des Rohlings mit dem Zuschneiden auf Fertigungsgröße und dem Einfügen von Bohrlöchern. Während diese bei einseitigen Platinen für die mechanische Befestigung von Gehäuseteilen, Steckern oder THT-Bauelementen genutzt werden können, dienen Bohrungen ab einer Lagenzahl > 1 auch der elektrischen Signalverteilung mittels Durchkontaktierungen. In [76] wird empfohlen die Umgebungstemperatur bei Bohr- und Ausrichteprozessen konstant zu halten ($22\text{ °C} \pm 1,1\text{ °C}$), um CTE bedingte Versatze zu vermeiden.

Bohren

Bei doppel- oder mehrlagigen Leiterplatten werden Durchkontaktierungen verwendet, um einzelne Signallagen elektrisch miteinander zu verbinden. Hierbei wird in den Bohrlöchern eine elektrisch leitfähige Startschicht angelagert (z.B. Palladium-Bekeimung, Carbon oder leitfähiges Polymer [76]), die anschließend in einer Kupfergalvanik metallisiert und verstärkt wird. Alternativ können auch Silber- oder Kupferpasten in die Bohrungen gedruckt werden. [76]

Durchkontaktierungen

Das Leiterbild wird durch einen chemischen Ätzprozess aus den Kupferlagen erstellt. Die hierfür notwendige Maskierung erfolgt durch ein Beschichtungsmaterial (Resist), welches gegenüber dem verwendeten Ätzmedium beständig ist. In der Regel handelt es sich bei dem Resist um lichtempfindlichen Fotolack, der in flüssiger- (Flüssig-Resist) oder in Folienform (Trocken-Resist) auf die Leiterplatte aufgebracht wird. [34] Nach der maskierenden Belichtung mit einer UV-Lichtquelle können die lokal belichteten Bereiche vernetzen (Negativ-Resist) oder ihre Bindung aufbrechen (Positiv-Resist). Anschließend können die entsprechenden Bereiche in einem Entwicklerbad ausgewaschen werden. Sowohl die Resist-Applikation als auch dessen Entwicklung sind Prozessschritte, die typischerweise bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden. [76]

Ätzresist

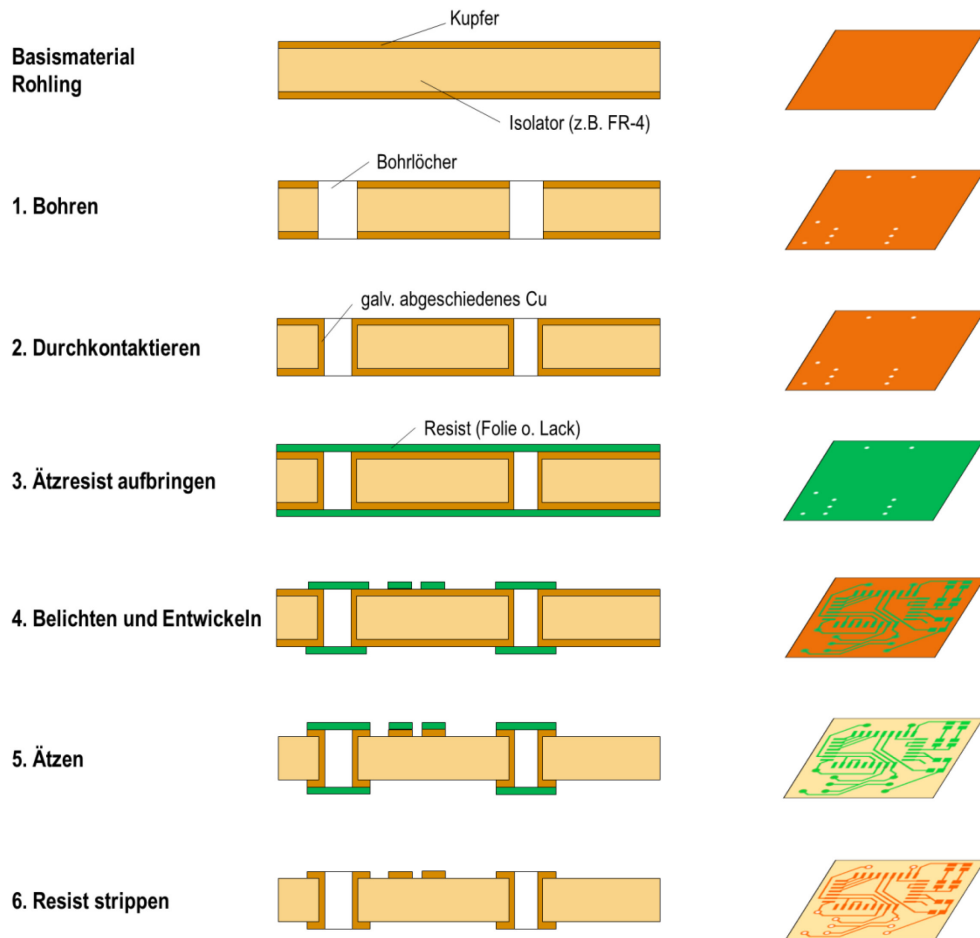


ABBILDUNG 2-11: SCHEMATISCHER ABLAUF DER FERTIGUNGSSCHRITTE EINER DOPPELSEITIGEN LEITERPLATTE

Die partiell durch den Resist geschützte Kupferlage kann nun in einem Ätzprozess strukturiert werden. Hierbei wird das Kupfer von einem zugeführten Ätzmedium chemisch aufgelöst und dessen Reaktionsprodukte abgeführt. In Tabelle 2-8 sind einige typische Ätzmedien aufgeführt, welche im Bereich der Leiterplattenstrukturierung Anwendung finden.

Nasschemisches
Kupferätzen

TABELLE 2-8: TYPISCHE ÄTZMEDIENTE FÜR DIE KUPFERSTRUKTURIERUNG BEI LEITERPLATTEN [77], [76]

Ätzmedium	Lösungsbestandteile	Bemerkungen
ammoniakalkalische Kupferlösung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CuCl_2 ▪ NH_3 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ gute Ätzqualität ▪ Metallresist nutzbar ▪ geringes Unterätzen ▪ Ätzrate: 65 – 75 $\mu\text{m}/\text{min}$ bei 20 – 45 °C
Kupfer(II)-chlorid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CuCl_2 ▪ HCL (32 Gew.-%) ▪ NaCl / NH_4Cl 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nicht für metallischen Resist geeignet ▪ Ätzrate: 30 – 45 $\mu\text{m}/\text{min}$ bei 45 – 50 °C ▪ regenerierbares Ätzmedium; preiswert
Eisen(III)-chlorid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ FeCl_3 (28 – 42 Gew.-%) ▪ HCL (bis zu 5 Gew.-%) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ätzt Kupfer und Kupferlegierungen (z.B. Konstantan) ▪ ätzt Ni-Fe Legierungen sowie Stahl ▪ Ätzrate variiert im Prozess ▪ aufwendige Bad-Entsorgung

Die typischen Betriebstemperaturen von Kupferätzbädern liegen nach [76] zwischen 47 °C bis 55 °C. Je nach verwendetem Ätzmedium verringert sich bei zu niedrigen Prozesstemperaturen die Ätzrate, also der Dickenabtrag des Kupfers pro Zeiteinheit. Die hier verwendeten Ätzmittel wirken isotrop mit dem Kupfer, wodurch es bei zu langer Ätzdauer zum Unterätzen kommen kann. Als besonders kritisch wird in [34] das Unterätzen bei der Verwendung von Metallresisten beschrieben. Nach dem Ätzprozess wird der verbleibende Polymerresist wieder entfernt und das Leiterbild ist fertig.

Für in dieser Arbeit erstellte Leiterplattenproben wurde der soeben beschriebene Prozessablauf genutzt. Industriell gefertigte Leiterplatten durchlaufen in der Regel noch weitere Prozessschritte. Hierzu zählen unter anderem das mechanische Ritzen zum Nutzentrennen, das Aufbringen von Lötstopplack und Bestückungsdruck sowie die chemische oder galvanische Metallisierung der Kupferoberflächen. Viele dieser Prozesse erfordern ebenfalls die Verarbeitung bei erhöhten Temperaturen.

Erweiterter Prozessablauf

2.1.3.2 MEHRLAGIGE LEITERPLATTEN

Bis auf das Bohren und das Durchkontaktieren erfolgt die Fertigung der Kernlagen des Multilayers analog dem Fertigungsablaufes aus Abbildung 2-11. Bohrprozesse werden bei mehrlagigen Leiterplatten nach dem Verpressen des Lagenaufbaues durchgeführt, da andernfalls Harzmaterial des Prepregs in die Durchbrüche gelangen könnte und diese wieder verschließt. Die vorgelagerten Prozessschritte für den Mehrlagenaufbau sind in Abbildung 2-12 schematisch dargestellt.

Weitere Prozessschritte beim Multilayer

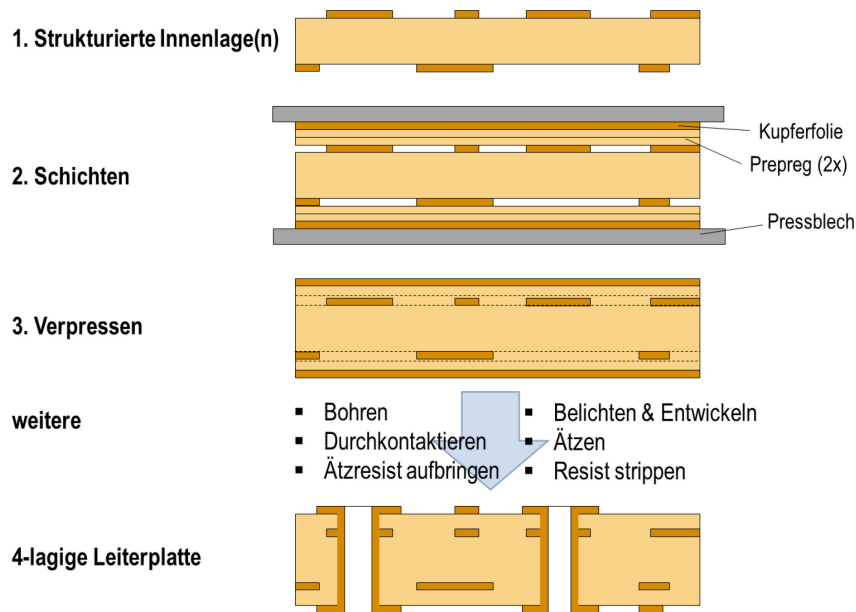


ABBILDUNG 2-12: WEITERE PROZESSSCHRITTE ZUR FERTIGUNG EINER MEHRLAGEN LEITERPLATTE

Für die Erzeugung des Mehrlagenaufbaus werden thermische Pressprozesse verwendet, wie sie auch bei der Herstellung vom Basismaterial eingesetzt werden. Allerdings wird hier eine Kombination von Lagen aus unvollständig gehärteten Prepregs und vollständig ausgehärteten Basismateriallagen genutzt und zu einem formschlüssigen Verbund verpresst.

Laminierprozess

Prepreg Materialien sollten möglichst kühl und trocken gelagert werden. Es wird in [78] empfohlen, die Zuschnitte vor dem Pressvorgang auf Raumtemperatur zu bringen und sie dabei in einem Exsikkator zu lagern. Dies soll später das Delaminationsrisiko verringern und übermäßigen Harzfluss vermeiden. Auch miteinander zu verpressende Außen- und Innenlagen sollten im Vorfeld getrocknet werden, da sowohl die Harzmatrix wie auch etwaige Oxidschichten Feuchte aus der Umgebung aufnehmen können. Die Quelle [78] empfiehlt zudem für Innenlagen ein Tempern von 1 h bei 120 °C und für einseitig kaschierte Außenlagen mindestens 4 h bei 140 °C, um die gesamte Feuchte zu entfernen.

Vorbehandlung der Presspartner

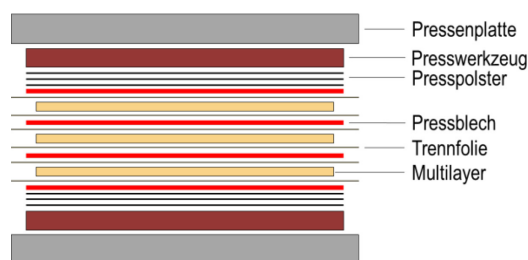


ABBILDUNG 2-13: TYPISCHER PRESSPAKETAUFBau (NACH [78])

Ein typischer Aufbau eines sogenannten Presspaketes für Multilayer ist in Abbildung 2-13 dargestellt. Neben einem oder mehreren Multilayern werden in der Industrie eine Reihe weiterer Werkzeuge zum Pressen verwendet. Das metallische Presswerkzeug erfüllt dabei die Funktionen der lateralen Druck- und Temperaturverteilung. Diese bestehen häufig aus Stahl (relativ geringer Ausdehnungskoeffizient), sind ca. 6 µm bis 18 µm dick [78] und sind etwas größer als der Multilayerzuschnitt, um Temperaturgradienten durch Randeffekte nicht auf diesen zu übertragen. Pressbleche sind nötig, wenn mehrere Multilayer verpresst werden. Vor allem bei einer ungleichmäßigen Kupferverteilung dienen sie der Wärmespreizung im Stapel. Außerdem sollen sie den Strukturübertrag von einem auf den anderen Lagenaufbau verhindern. Weitere Schichten sind Presspolster und Druckausgleichsfolien für die Homogenisierung des Druckes über die Prozesszeit sowie Trennfolien für das anschließende Herauslösen des verpressten Multilayers. Für eine gute Passgenauigkeit der einzelnen Lagen werden außerdem Stifte verwendet, an welchen diese ausgerichtet werden können.

Pressaufbau

Als Presssystem kann im Allgemeinen zwischen hydraulischen Pressen und Autoklaven (Überdruckkammern) unterschieden werden, wobei letztere seit einigen Jahren eher selten Verwendung finden. Fast ausschließlich wird beim Laminieren auf Vakuumprozesse gesetzt, wodurch sich die Problematik von Lufteinschlüssen und Restfeuchte im Stapel reduzieren lässt. [76] Eine interessante Entwicklung ist die ADARA-Presse, welche in [79] beschrieben wird. Anstelle von beheizten äußeren Pressplatten wird hier die notwendige Prozesswärme an einer durchgehenden, elektrisch beheizten Kupferfolie direkt im Pressstapel erzeugt. Hierdurch sollen eine gleichmäßigere Temperaturverteilung und höhere energetische Effizienz erreicht werden. [79] Auf Grund des Heizprozesses über die Kupferfolien kann dieses Verfahren nur zur Basismaterialfertigung eingesetzt werden. Eine ähnliche Anwendung wäre mit den hier untersuchten Heizschichten denkbar.

Presssysteme

Die jeweiligen Pressparameter orientieren sich an dem eingesetzten Presssystem, dem Lagenaufbau und vor allem an dem zu verarbeitenden Materialtyp. Eine Konsultation des entsprechenden Prepreg-Datenblattes ist daher erforderlich. Der grundlegende Presszyklus setzt sich aber stets aus den in Abbildung 2-14 dargestellten vier Phasen zusammen. Der Druck wird während der Aufheizphase niedrig gehalten, um dem Harz ausreichend Zeit zum Fließen zu geben („Kiss“-Profil) und nicht auszuhärten, bevor ein hinreichender Formschluss zu Stande kommt. Insgesamt liegen typische Prozesszeiten zwischen 90 min bis 120 min mit maximalen Temperaturen bis 200 °C. [76]

Pressablauf

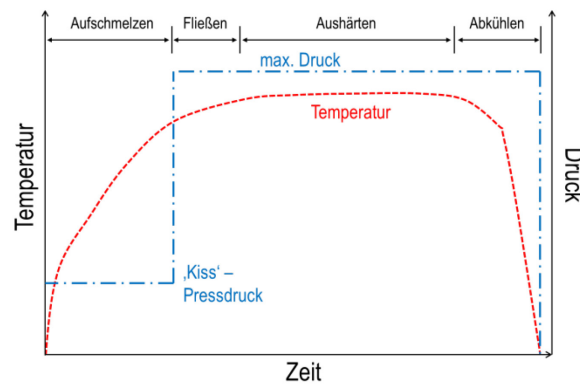


ABBILDUNG 2-14: TYPISCHE TEMPERATUR- UND DRUCK-PARAMETER EINES HYDRAULISCHEN LAMINIERPROZESSES (NACH [76])

Für die zu Beginn dieser Arbeit bereits erwähnten Technologietreiber Miniaturisierung und Multifunktionalität in Leiterplatten sind technologische Integrationsprozesse, wie das Embedding, ein wichtiger Faktor. Generell versteht man unter „Embedding“ (Einbetten) jenen Gesamtprozess, welcher zusätzliche Schichten, Komponenten und funktionale Elemente in ein umgebendes System einbringt. Ähnlich wie bei der Integration zusätzlicher Verdrahtungsebenen durch die Multilayer-Presstechnik, können mittels verschiedener Embedding-Technologien auch passive [80] und aktive [81] Bauelemente oder andere funktionale Strukturen [15] platzsparend in der Leiterplatte erzeugt werden. Nach [82] lassen sich durch das Einbetten von Bauelementen etwa 30 % bis 50 % an Platz auf den Außenlagen einsparen. Analog zur Multilayer-Technik begannen die frühesten Anwendungen dabei mit dem Einlaminieren von flächigen resistiven [83] und dielektrischen [84], [85] Folien, um Widerstände beziehungsweise Kapazitäten zu realisieren. Aktuellere Anwendungen beruhen zudem auf der Kombination von mechanischen Bearbeitungen des Substrates, für Vertiefungen und vertikale Ankontaktierungen, sowie Laminiertechniken. Einige Beispiele hierzu werden in [9] präsentiert.

Embedding

2.2 FERTIGUNG ELEKTRONISCHER BAUGRUPPEN

In diesem Abschnitt soll die zuvor vorgestellte Leiterplatten-Fertigungstechnologie um die grundlegenden Prozesse zur Herstellung der kompletten Baugruppe erweitert werden. Die hier untersuchten Heizschichten sollten später mindestens mit dem Beginn der Baugruppenfertigung einsatzbereit und nutzbar sein. Somit wären sie als unterstützendes Element des Fertigungsprozesses durchaus interessant. Zudem müssen die nachgelagerten Prozesse beim Heizsystem-Design bedacht werden, um unerwünschte Wechselwirkungen zu vermeiden.

Einordnung dieses Abschnittes

2.2.1 ARTEN VON BAUGRUPPEN

Eine elektronische Baugruppe besteht grundlegend aus einer strukturierten Leiterplatte und den darauf befestigten und kontaktierten elektronischen Bauteilen. Eine sinnvolle Möglichkeit zur Einteilung von Baugruppentypen lässt sich anhand der verwendeten Bestückungstechnologie vornehmen. Abbildung 2-15 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Baugruppentechologien. Es kann zwischen reinen THT-Baugruppen, bei denen die Bauelemente mittels Durchsteckmontage bestückt werden, und reinen SMT-Baugruppen, bei denen die Bauteile oberflächenmontiert sind, unterschieden werden. Eine durchschnittliche Baugruppe, wie man sie heutzutage findet, stellt häufig eine Mischbestückungen aus beiden Technologien dar. Außerdem geht der Trend verstärkt zum Einbetten von Komponenten und funktionalen Strukturen.

Einteilung nach
Bestückung

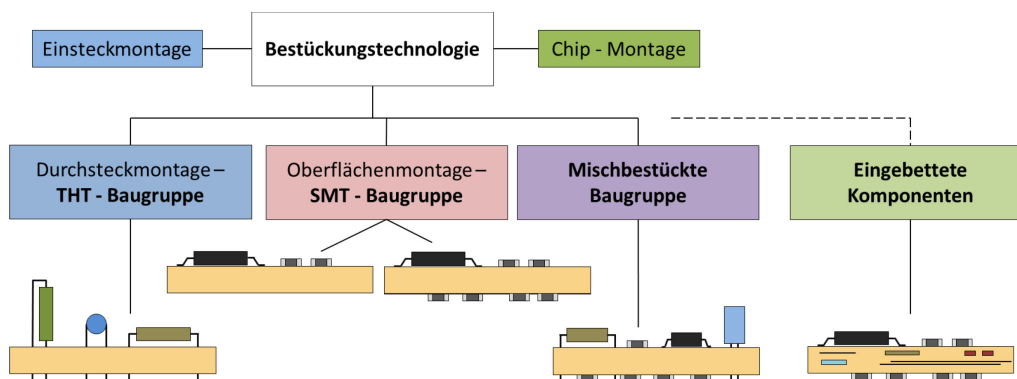


ABBILDUNG 2-15 BAUGRUPPENARTEN ANHAND IHRER BESTÜCKUNGSTECHNOLOGIE (NACH [86] – ERWEITERT UM „EINGEBETTETE KOMponenten“)

Bei der Durchsteckmontage werden die Anschlussdrähte der Bauteile durch Bohrungen ins Trägermaterial gesteckt und im Anschluss mittels Wellen- oder Selektivlöt verbunden. Bei einseitigen Platinen entsteht die Lötverbindung am metallischen Restring der Bohrung auf der dem Bauelement abgewandten Seite. Doppel- und mehrlagige Platinen werden in der Regel durchkontaktiert, so dass sich die Lötverbindung auf die Metallisierung der Bohrung ausweitet. Anders als bei SMT-Baugruppen werden THT-Bauelemente (THT) normalerweise nur von einer Seite aus bestückt.

Durchsteckmontage

Bei der SMT werden die Bauelemente nur auf die Oberfläche des Trägermaterials, auf zuvor applizierte Lotpastendepots oder Preforms, gesetzt. Die Lötverbindung bildet sich beim Umschmelzvorgang zwischen Pad und Bauteilanschluss (Lead). Treiber dieser Technologie war und ist die anhaltende Miniaturisierung. Die steigende Funktionsdichte von Integrierten Schaltkreisen (IC) erfordert mehr Ein- und Ausgänge auf kleiner werdendem Raum und Signallaufzeiten müssen durch kürzere Leitungslängen reduziert werden. [35] Außerdem erlaubt die SMT eine beidseitige Nutzung der Leiterplatte,

Oberflächenmontage

indem die rückseitigen SMD's mit einem speziell applizierten Kleber fixiert werden. Diese Chipkleber sind in der Regel 1-komponentige Acrylat- oder Epoxid-Harzsysteme. [77]

Anders als die vorherigen sind Baugruppen mit eingebetteten Komponenten keine einfache Weiterentwicklung der reinen Bestückungstechnologie, sondern vielmehr eine Kombination aus angepasster Bestückung und erweiterter Fertigungstechnologie der Leiterplatte. Während sich die Fertigung der Leiterplatte als auch der Baugruppe bei THT und/oder SMT klar voneinander trennen lassen, ist dies beim Embedding nicht mehr möglich. Die Produktion der Baugruppe erfordert hier die Erweiterung und Abstimmung von vorgelagerten Prozessen in der Phase der Platinenproduktion. Die Außenlagen beinhalten hier weiterhin SMT/THT oder eine Mischung von beidem, wobei THD's hier häufig dem Bedarf an Einbettplätzen in der z-Achse weichen müssen.

Eingebettete
Komponenten

2.2.2 WEICHLÖTTECHNOLOGIE

In diesem Abschnitt soll kurz auf die Grundlagen der Löttechnologie, die dazugehörigen Materialien und Applikationsmethoden eingegangen werden. Dies erscheint zweckmäßig, da die Abbildung eines Lötprozesses auf Leiterplatte eine lohnende Anwendung für integrierte Heizschichten darstellt. Des Weiteren sind Auftragsmethoden für Lotpastengemische, wie zum Beispiel der Sieb- und Schablonendruck und auch das Dispensieren ebenfalls für die Applikation der von hier untersuchten Heizmaterialien denkbar. Am Ende des Abschnitts werden verschiedene Lötverfahren vorgestellt, anhand derer sich gut darstellen lässt, wie Wärmeenergie den Fügestellen bzw. den Baugruppen zugeführt werden kann.

Gliederung des
Abschnitts

Im Bereich der elektronischen Baugruppenfertigung werden verschiedene Verbindungstechnologien eingesetzt, um elektrische bzw. elektronische Komponenten stoffschlüssig miteinander zu verbinden. Hierzu zählen unter anderen das Leit-Kleben, Bonden, Sintern, Schweißen und vor allem das Löten.

Verbindungstechno-
logien

Das Fügen von elektronischen Bauelementen auf herkömmlichen Leiterplatten erfolgt standardmäßig durch Weichlöten. Nach der Einteilung in DIN 8505-5 [87] spricht man bei der Verarbeitung von Loten, deren Liquidustemperatur (T_L) unterhalb von 450 °C liegt, vom Weichlöten, darüber hinaus vom Hartlöten und ab 900 °C vom Hochtemperaturlöten. Diese Einteilung ist historisch bedingt und leitet sich von der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffes Eisen her [88]. Für das Löten auf FR-4 basierten Leiterplatten sind auf Grund der Materialeigenschaften (T_G, T_D) jedoch nur Temperaturen bis maximal 300 °C (kurzzeitig) relevant.

Einteilung von
Lötprozessen

2.2.2.1 LOTWERKSTOFFE

Der Definition nach ist Löten die Erzeugung einer Stoffschlussverbindung zwischen Werkstoffen ungleicher chemischer Zusammensetzung und gleicher chemischer Bindung. [88] Diese stoffschlüssige Verbindung wird erzeugt, indem ein Füllmaterial zwischen die Fügepartner gebracht und dort erwärmt wird, bis es schmilzt. Anders als beim Schweißen sollen die Fügepartner aber ihren Aggregatzustand nicht verändern.

Definition Löten

Die oberen Temperaturgrenzen für Lötprozesse auf Leiterplatten stellen allerdings die Glasübergangstemperaturen und Zersetzungstemperaturen von Kunststoffen dar, welche Teile der Baugruppe sind. Diese finden sich zum einen im Basismaterial und zum anderen als Teil von Bauteilgehäusen und Verkapselungen auf der Bestückungsebene. Am verbreitetsten sind hier duroplastische Epoxide, deren Glasübergangstemperatur um die 150 °C liegt. Bei Überschreiten dieser Temperatur geht das Material von einem harten in einen weichen, glasartigen Zustand über, was bei längerer Expositionszeit zu einer Beeinträchtigung der Formstabilität führen kann. Beim Erreichen der Zersetzungstemperatur, welche für Epoxide zwischen 300 °C bis 350 °C liegt, setzt dann ein rapides Degradationsverhalten des Kunststoffes ein. [89] Vor allem simultane Lötprozesse, bei welchen die gesamte Baugruppe den Prozesstemperaturen ausgesetzt ist, werden hierdurch thermisch und zeitlich limitiert.

Temperaturgrenzen

Als Lotwerkstoff für elektronische Baugruppen werden überwiegend Zinn basierte Metalllegierungen verwendet, deren Schmelzpunkte deutlich unterhalb von 300 °C liegen. Viele Lotlegierungen haben keinen festen Schmelzpunkt, sondern einen Schmelzbereich, der durch Solidustemperatur, unter der das Material komplett fest ist, und Liquidustemperatur, ab der das Material vollständig in flüssige Form übergeht, gekennzeichnet ist. Tabelle 2-9 beinhaltet eine Übersicht über ausgewählte Lotlegierungen, die in der Elektronikproduktion zum Einsatz kommen können.

Typische
Lotmaterialien

TABELLE 2-9: BEISPIELE EINIGER TYPISCHER LOTLEGIERUNGEN [90]

Bezeichnung	Zusammensetzung	Schmelzpunkt (Solidus/Liquidus) / °C	Anwendungen
Sn42Bi58	Zinn: 42% Bismut 58%	138	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schmelzsicherung ▪ Löten bei niedrigen Prozesstemperaturen ▪ Consumer Elektronik
Sn63Pb37	Zinn: 63% Blei 37%	183	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standard-Elektronik Lot (vor Einführung der RoHS Richtlinie)
SnAg3Cu0,5 „SAC305“	Zinn: 96,5% Silber: 3% Kupfer: 0,5%	217/220	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standard-Elektronik Lot
SnAg3,5	Zinn: 96,5% Silber: 3,5%	221	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automotive Bereich

Je nach Anwendung und Anforderungsprofil an die Lötverbindung werden dem Lotbasiematerial verschiedene Metalle hinzulegiert, wodurch sich Mischkristalle der jeweiligen Elemente bilden. Je nach Legierungsadditiv und Stoffmenge können so unterschiedliche Eigenschaften des Lotsystems beeinflusst werden. Hierzu gehören vor allem Schmelzbereich, Festigkeit, Fließ- und Benetzungsverhalten sowie das Ablegieungsverhalten mit dem Feststoff des Fügepartners.

Legierungseinflüsse

Ein gutes Beispiel hierfür ist die Schmelzpunktniedrigung von Sn42Bi58 auf 138 °C. Wie sich im Bi-Sn-Phasendiagramm (Abbildung 2-16) erkennen lässt, bildet die Legierung bei dieser Mischung ein sogenanntes Eutektikum, also einen Punkt, an dem Solidus- und Liquiduslinie zusammentreffen und die geringste Schmelztemperatur vorliegt.

Eutektikum im Phasendiagramm

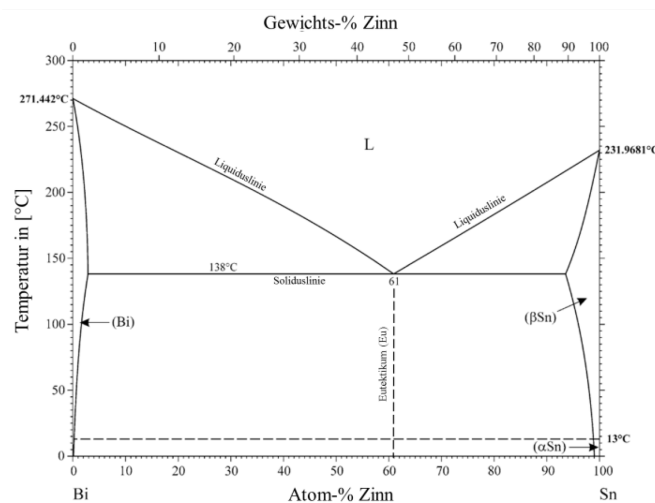


ABBILDUNG 2-16 BINÄRES PHASENDIAGRAMM DES SYSTEMS BISMUTH-ZINN [91]

Auf Grund eines relativ niedrigen Schmelzpunktes in Kombination mit guten Benetzungs- und Fließigenschaften waren Sn63Pb37 und andere Zinn-Blei Lote lange Zeit Standard in der Elektronikfertigung. Dies hat sich seit dem 1. Juli 2006 geändert, als in

RoHS Verordnung

der Europäischen Gemeinschaft die Richtlinie 2002/95/EG (inzwischen ersetzt durch 2011/65/EG [92]) in Kraft trat. Neben anderen Substanzen wird hier auch die Verwendung von Blei in Elektro- und Elektronikgeräten auf maximal 0,1 % Höchstkonzentration in einem homogenen Werkstoff festgesetzt. Abgesehen von speziellen Ausnahmen für Militär-, Medizin- und Raumfahrttechnik musste das Blei als Legierungselement in Lotwerkstoffen in der Elektronikindustrie ersetzt werden.

Infolgedessen wurden vor allem Zinn-Silber-Kupfer-Lote entwickelt, um die bleihaltigen Lote zu ersetzen. Die hiervon am häufigsten verwendeten SnAgCu-Systeme haben je nach Zusammensetzung einen Schmelzbereich zwischen 216 °C bis 219 °C. [93] Diese Umstellung hatte somit auch eine grundlegende Erhöhung der Prozesstemperaturen für das Löten um durchschnittlichen 30 K zur Folge. Laut [94] erhöhte sich hierbei der Energieverbrauch für industrielle Fertigungslinien mit den bleifreien SnAgCu-Systemen um etwa 15 % im Vergleich zum vorherigen Einsatz von SnPb37.

Substitution von Blei

Ein Vergleich der Benetzungseigenschaften von bleifreien Legierungen mit eutektischen SnPb-Loten wird in [95] beschrieben. Es hat sich gezeigt, dass die Benetzungszeiten und Benetzungswinkel auf allen gängigen Oberflächenmetallisierungen bei bleifreien Lötloten größer sind und diese sich erst bei einer Überhitzung von ca. 50 °C dem Benetzungsverhalten von SnPb annäherten. Der Einsatz von Stickstoffatmosphäre im Lötprozess kann das bleifreie Benetzungsverhalten verbessern, aber nicht auf das Niveau von eutektischen SnPb-Loten bringen. [93]

Vergleich bleihaltig – bleifrei

Neben seiner stofflichen Zusammensetzung ist auch die Form des Lotwerkstoffes relevant. In der automatisierten Fertigung elektronischer Baugruppen findet man inzwischen überwiegend Lotpasten. Diese bestehen aus einem definierten Gemisch von kugelförmigem Metallpulver (der jeweiligen Lotlegierung) und einem zähflüssigen Flussmittel. Ein Flussmittel hat bei einem Lötprozess die Aufgabe, für eine gute Benetzung der Fügepartner zu sorgen, indem es deren Oberflächen von Oxiden reinigt und weitere Oxidbildung im Prozess verhindert.

Aufbau von Lotpasten

2.2.2.2 APPLIKATIONSVERFAHREN VON PASTEN UND GEMISCHEN

Dispensen ist ein selektives Beschichtungs- und Applikationsverfahren das zum Beispiel beim dosierten Auftrag von Lotpasten oder beim lokalen Schutzlackieren auf Baugruppen zum Einsatz kommt. Das Druckgut befindet sich hierbei in einem Vorrat oberhalb einer Kapillare. Mittels einer Kraft (meist Druckluft) wird das Gemisch durch die Düse gedrückt und auf den gewünschten Punkt oder Bereich appliziert. (Abbildung 2-17)

Applikation mittels Dispensen

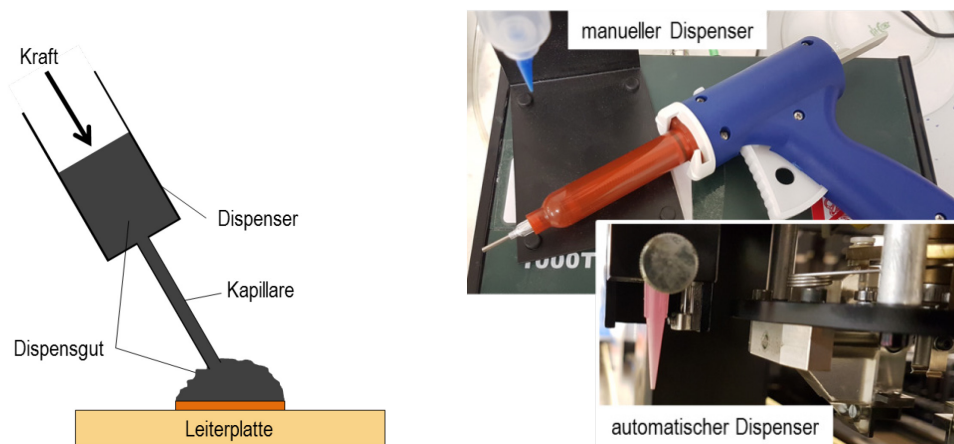


ABBILDUNG 2-17: PRINZIP DER DISPENSTECHNIK (LINKS, NACH [96]) UND BEISPIEL FÜR EINEN MANUELLEN DISPENSER (RECHTS OBEN) UND EINE AUTOMATISCHE DISPENSEINRICHTUNG EINES BESTÜCKUNGSAUTOMATEN (RECHTS UNTEN)

Automatisierte Systeme, wie sie auch in der Elektronikfertigung zu finden sind, werden nach CAD-Daten bewegt und können so sehr schnell agieren. Dennoch bedeutet der Einsatz von Dispensstechnologien häufig einen höheren Zeitaufwand als die Applikation mittels simultaner Druckverfahren. Die Technologie findet verstärkten Einsatz in Kombination mit dem immer häufigeren und komplexeren Einsatz von 3D-Drucktechnologien, die auf dem Heiß-Dispensen von Polymer-Filament beruhen. In [97] wurden mittels dieser Technologien Heizstrukturen aus Silberpaste in einem FFF-Bauteil aus ABS integriert. (Abbildung 2-18)

Beispiele für
Dispensarbeiten

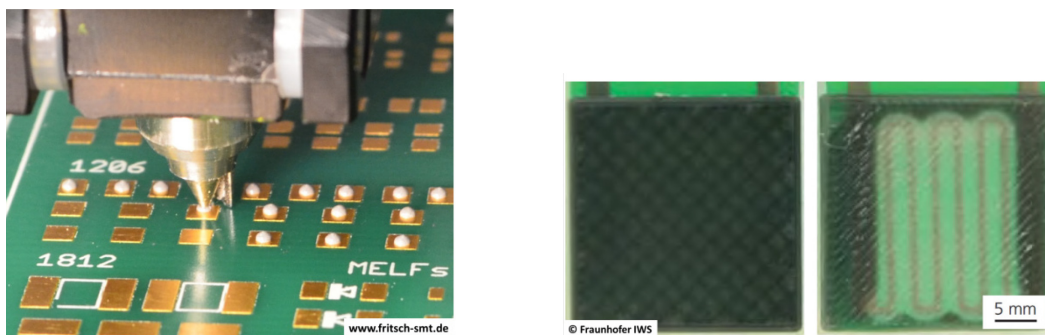


ABBILDUNG 2-18: BEISPIELE FÜR DISPENSARBEITEN: DOSIERUNG VON SILBERLEITKLEBER (LINKS); INTEGRIERTE HEIZSTRUKTUR AUS AG-LEITPASTE IN 3D-DRUCKKÖRPER [97] (RECHTS)

Der industrielle Siebdruck ist eines der bewährtesten Applikationsverfahren im Bereich der Elektroniktechnologie. Daher stammt auch der ursprüngliche Begriff der ‚gedruckten Schaltung‘. Beim Siebdruck wird ein über Rahmen gespanntes Siebgewebe verwendet, über welches das Druckgut mit Hilfe einer Rakelvorrichtung durch die Öffnungen des Siebes hindurch auf das zu bedruckende Substrat (Leiterplatte) übertragen

Applikation mittels
Siebdruck

wird. (Abbildung 2-19) Das Druckgut muss hierfür in bestimmter Viskosität (Lack- oder Pastenform) vorliegen und besteht üblicherweise aus einem Gemisch von Organik (Löse- und Bindemittel) und verschiedenen Partikeln (z.B. Lotkugeln, Carbon-Partikel,...).

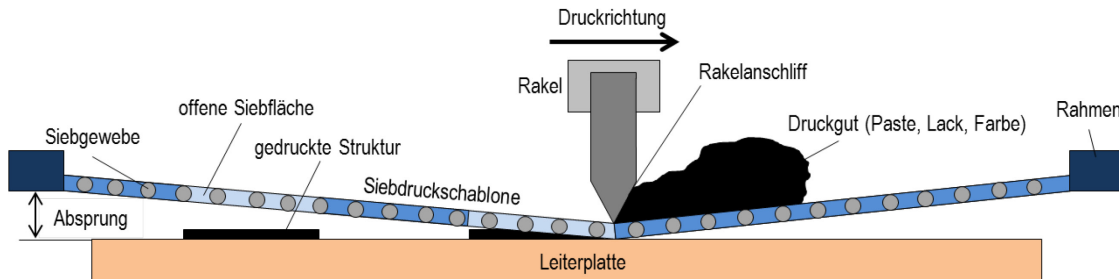


ABBILDUNG 2-19: PRINZIP DER APPLIKATION MITTELS SIEBDRUCK (NACH [52])

Das jeweilige Druckbild ergibt sich aus einer vorherigen Strukturierung des Siebes, bei welcher die zu druckenden Flächen im Gewebe durchlässig bleiben. Nicht zu bedruckende Bereiche sind im Gewebe gefüllt. Eine theoretische Berechnung des sich ergebenden Schichtauftrages $\delta_{Schicht}$ ergibt sich aus der offenen Siebfläche multipliziert mit der Gewebedicke D wie folgt:

$$\delta_{Schicht} = \left(\frac{w}{w + d} \right)^2 \cdot D \quad (\text{Gl. 2-8})$$

Hierbei ist w die Maschenweite und d der Drahtdurchmesser der einzelnen Siebfäden. Nach [52] lässt sich als Gewebedicke die doppelte Fadenstärke ($2d$) plus die überstehende Emulsionsschicht des Siebes annehmen. Eine häufige Angabe bei Sieben ist die Mesh-Zahl, welche die Anzahl der Maschen pro englischem Zoll angibt:

$$Mesh = \frac{25,4 \text{ mm}}{(w[\text{mm}] + d[\text{mm}])} \quad (\text{Gl. 2-9})$$

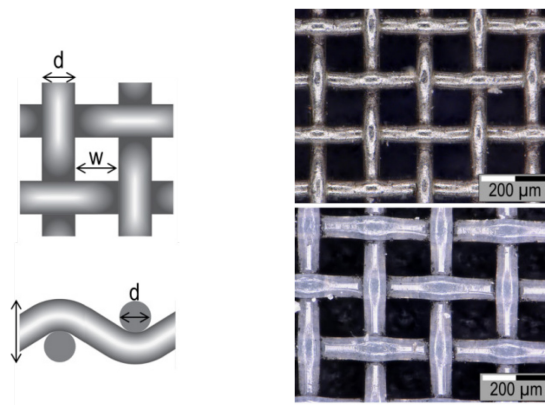


ABBILDUNG 2-20: SIEBGeweBE; WICHTIGE GewEBEPARAMETER (LINKS); BEISPIELE FÜR EIN EDelSTAHLSIEB (RECHTS ObEN) UND EIN POLYESTERSIEB (RECHTS UNTEn)

Im Bereich der Leiterplattentechnologie werden überwiegend Nylon-, Polyester- und rostfreie Edstahlgewebe verwendet. [52] Metallgewebe, wie in Abbildung 2-20 rechts oben dargestellt, liefern sehr gute Druckergebnisse mit einer höheren Genauigkeit. Ihre Standzeiten im Gegensatz zu Polyestergeweben (Abbildung 2-20 rechts unten) werden von [96] als größer und von [52] als geringer angegeben. In Tabelle 2-10 sind einige Beispiele für gängige Siebgrößen beim Lotpastendruck aufgeführt. Laut [96] sollten Pulverteilchen im Druckgut etwa eine Größe von 25 % bis 30 % der jeweiligen Sieböffnung aufweisen.

Typische Siebgrößen

TABELLE 2-10: ÜBLICHE SIEBGRÖßEN FÜR DIE APPLIKATION VON LOTPASTE [96]

Mesh	Drahtdurchmesser d / mm	Maschenweite w / mm	Offene Siebfläche / %
40	0,14	0,5	61
80	0,125	0,2	38
120	0,063	0,15	50

Das Siebdruckverfahren findet in verschiedenen Stadien der Leiterplattenfertigung Anwendung, wie z.B. beim Druck von Ätzresisten, Lötstoppsmasken, Bestückungsdruck und beim Druck von Schutzlacken. [52] Bis vor einigen Jahrzehnten war der Siebdruck auch das am häufigsten eingesetzte Verfahren bei der Applikation von Lotpasten für den Reflowlötprozess zur Baugruppenfertigung. Abbildung 2-21 zeigt im linken Bild ein Beispiel für den angewandten Siebdruck zum Übertragen von Graphen-Tinte auf ein Trägermaterial. Da mit dem zunehmenden Einsatz von flexiblen Substraten auch die Nachfrage nach flexiblen Leitern und Elementen steigt, werden häufig leitfähige oder funktionalisierte Tinten mittels Siebdruck oder im Inkjet-Druck [98] appliziert. Im Bereich der Dickschichttechnik ist der Siebdruck pulverbasierter Pasten, wie z.B. der Dickschicht-Heizer in Abbildung 2-21 (rechts) veranschaulicht, ebenfalls weit verbreitet.

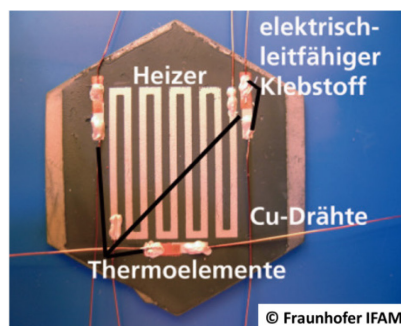
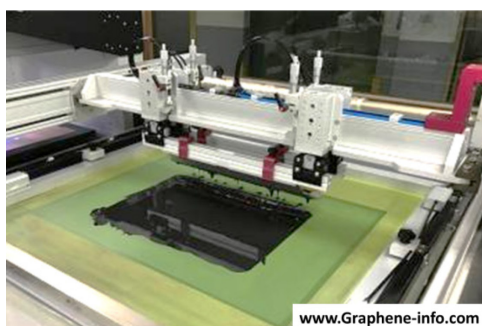
Beispiel für
Siebdrucke

ABBILDUNG 2-21: BEISPIEL FÜR SIEBDRUCK: SIEBDRUCK VON FUNKTIONALISIERTEN TINTEN (LINKS); SIEBGEDRUCKTER KONSTANTAN-HEIZER AUS METALLPASTE [99] (RECHTS)

Infolge der anhaltenden Miniaturisierung stößt der Siebdruck jedoch schnell an die Grenze seiner geometrischen Möglichkeiten. Kleiner werdende Bauteile (z.B. Chip-Widerstände der Bauform 0201, 01005) und engere Strukturbreiten (z.B. Fine-Pitch < 0,25 µm) erfordern einen ebenso feinen wie genauen Auftrag von Lotpaste, welcher in Siebtechnik nicht mehr realisierbar ist. Daher hat sich z.B. für den Lotpastendruck inzwischen der Einsatz von präzisen, lasergeschnittenen Metallschablonen durchgesetzt. Im Gegensatz zum Siebdruck, bei welchem ein Absprung erforderlich ist, um saubere Strukturen zu erzeugen, wird die Metallschablone direkt auf das Substrat gelegt. Mittels Rakel wird auch hier das Druckgut in die Öffnungen gedruckt und so auf das Substrat übertragen. (Abbildung 2-22)

Schablonendruck

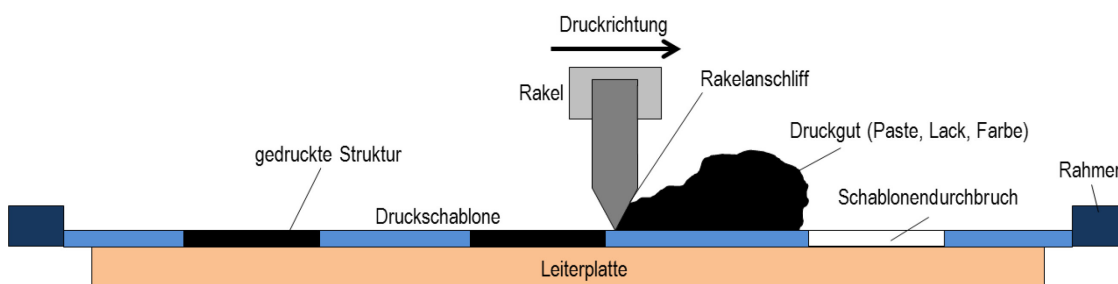


ABBILDUNG 2-22: PRINZIP DER APPLIKATION MITTELS SCHABLONENDRUCK (NACH [100])

Da das Auslösen des Druckgutes nicht über einen Absprung, sondern vielmehr über die erhöhte Adhäsion zum Substrat gegenüber den Schablonenöffnungen entsteht, gibt es einige Richtwerte, welche bei der Schablonenerstellung beachtet werden sollten. Das Öffnungsverhältnis aus kleinster Öffnungsbreite l und Schablonendicke d ergibt sich nach

Daumenregeln zur Fehlervermeidung

$$\text{Öffnungsverhältnis} = \frac{l}{d} > 1,5 \quad (\text{Gl. 2-10})$$

und sollte stets größer sein als 1,5. Zusammen mit einem empfohlenen Flächenverhältnis $> 0,66$ (Gl. 2-11) lassen sich hiermit gute Schablonenparameter, wie sie Abbildung 2-23 zeigt, definieren. Andernfalls dominieren die Adhäsionskräfte zwischen Druckgut und Schablonenwandung gegenüber denen von Druckgut und Substrat, wodurch kein sauberes Herauslösen mehr gegeben ist.

$$\text{Flächenverhältnis} = \frac{l \cdot b - r^2(4 - \pi)}{2d[l + b + r(\pi - 4)]} > 0,66 \quad (\text{Gl. 2-11})$$

Weiter verbessern lässt sich das Auslöseverhalten durch eine Verringerung der Oberflächenrauigkeit in der Wandung, z.B. mit Elektropolieren [100] und durch runde Ecken mit einem Radius r in der Padöffnung.

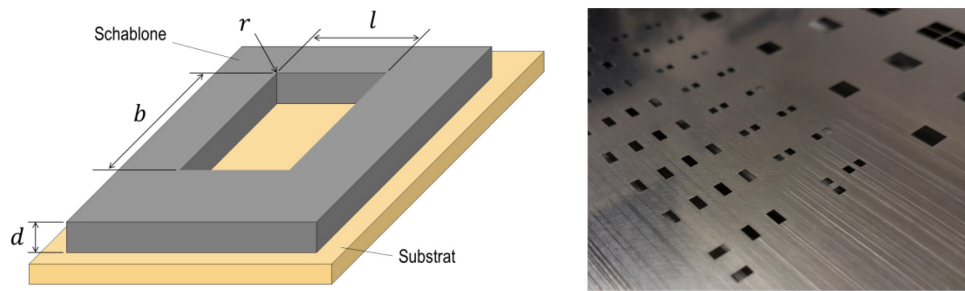


ABBILDUNG 2-23: METALLSCHABLONE; SCHABLONENÖFFNUNGSPARAMETER (LINKS)(NACH [93]); BEISPIEL FÜR EINE LASERGESCHNITTENE LOTPASTENSCHABLONE (RECHTS)

Für einen erfolgreichen Druckprozess müssen eine ganze Reihe von Parametern und Einflussgrößen überwacht, kontrolliert und angepasst werden. Neben den zuvor beschriebenen Schablonenparametern zählen hierzu Rakelmaterial (z.B. Stahl, Gummi), Rakeldruck, Rakelgeschwindigkeit, die Viskosität des Druckgutes sowie die Form und Größe der zu druckenden Partikel.

Einflussfaktoren für
Druckprozess

Bei der Baugruppenfertigung erfolgt im Anschluss an die Applikation des Lotmaterials das Bestücken der Bauelemente. Sofern benötigt, wurden die hier erstellen Testbaugruppen mit einer Kombination aus manuellem „Pick&Place“ und maschineller Bestückung am Automaten erstellt. Auf die Beschreibung dieser Prozesse soll in dieser Arbeit verzichtet werden. Es sei stattdessen auf geeignete Literatur wie zum Beispiel [76] und [34] verwiesen.

Bestückung

2.2.2.3 EINTEILUNG UND ARTEN VON WEICHLÖTVERFAHREN

Als Lötverfahren bezeichnet man den Prozess, bei welchem dem jeweiligen Lotwerkstoff thermische Energie zugeführt wird, um dessen Temperatur soweit zu erhöhen, dass er aufschmilzt und mit den entsprechenden Fügepartnern unter Bildung einer Diffusionszone reagiert. [34] In der Leiterplattenfertigung stellt ein Lötverfahren den wohl thermisch anspruchsvollsten Prozess dar. Zudem sind die verschiedenen Lötverfahren auf Grund der hohen geforderten Flexibilität sehr vielseitig, wodurch diese sich gut als Einstieg in den Stand der Technik von Erwärmungsmethoden für Leiterplatten eignen. Die hier vorgestellten „klassischen“ Lötprozesse sind daher aus Beschreibung der möglichen Erwärmungsverfahren auf Leiterplatten (in Kapitel 3.1) ausgenommen.

Lötverfahren allge-
mein

Als Reflowlöten (Wiederaufschmelzlöten) bezeichnet man üblicherweise alle Lötverfahren, bei welchen zuvor aufgebrachtes Lot (z.B. Pastendepots) ohne eine weitere Lotzufuhr durch Aufschmelzen zum Löten gebracht wird. [96] Somit findet man Reflowlötverfahren hauptsächlich im industriellen Umfeld, und sie grenzen sich damit von manuellen Verfahren, wie z.B. dem Handlöten, ab. In Abbildung 2-24 ist nach [96] eine Über-

Reflowlöten

sicht über verschiedene Reflowlötverfahren nach der Art der Wärmezufuhr und dem Bereich der Heizwirkung dargestellt. Für die in dieser Arbeit untersuchte Lösung ließe sich Abbildung 2-24 um ein weiteres Feld mit der Bezeichnung ‚Aufheizung von Innen‘ erweitern.

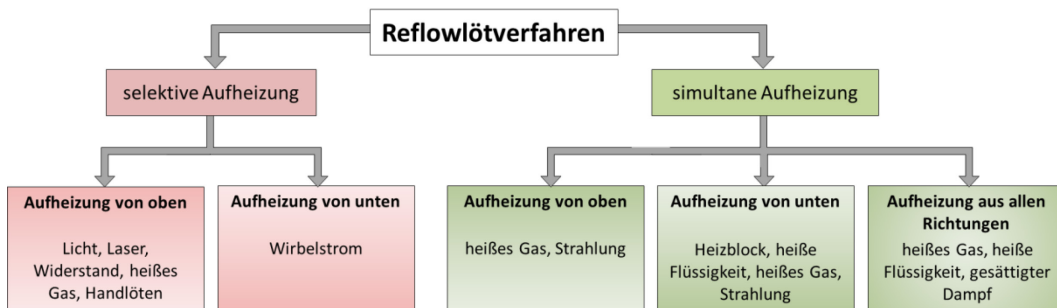


ABBILDUNG 2-24: ÜBERSICHT ÜBER DIE REFLOWLÖTVERFAHREN (NACH [96])

In der Darstellung werden zeitliche (simultan \leftrightarrow sequentiell) und örtliche (selektiv \leftrightarrow global) Aufheizvorgänge miteinander vermischt. Hierbei entsteht der fälschliche Eindruck, dass z.B. selektive Prozesse nicht auch simultan ablaufen können. Theoretisch sind mit einer segmentierten und individuell ansteuerbaren integrierten Heizschicht alle vier Prozess-Kombinationen denkbar. Das soll durch Abbildung 2-25 verdeutlicht werden.

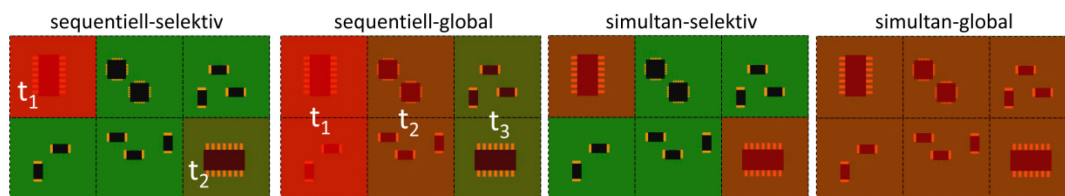


ABBILDUNG 2-25: PRINZIPDARSTELLUNG FÜR DEN ZEITLICHEN UND ÖRTLICHEN PROZESSEINSATZ EINZELNER INTEGRIERTER HEIZSCHICHTEN

Die Methoden zum simultan erwärmenden Löten beschreiben Massenfertigungsprozesse, bei welchen die Baugruppen vollständig (global) erwärmt und die Lötverbindungen nahezu zeitgleich erzeugt werden. Ein typischer Vertreter ist das Löten in Förderband-durchfahrenen Reflowöfen mittels Zwangskonvektion. Als weitere Verfahren sind das Dampfphasenlöt und Infrarotlöt zu nennen. [86] Das ebenfalls global arbeitende Wellenlöt hat wiederum eher einen sequentiellen Charakter.

Simultane Prozesse

Selektive Prozesse werden hingegen häufig für Reparatur- oder Sonderlötvorgänge eingesetzt, wenn es darum geht, die restliche Baugruppe vor der Lötwärme zu bewahren. Daher sind selektive Prozesse in ihrer Prozesstechnik häufig aufwendiger und kostenintensiver. Deshalb ist man bestrebt ihren Einsatz gering zu halten. Typische

Selektive Prozesse

Vertreter für diese Verfahren sind Mini-Schwalllötten, Licht- und Laserlötten, Induktionslötten und Bügellötten. [86]

In der Elektronikindustrie ist das Löten mit Zwangskonvektionsanlagen am weitesten verbreitet. Diese Systeme beinhalten eine Reihe von Heizzonen mit unterschiedlich hoch einstellbaren Heizstrahlern zur Erwärmung von Luft oder eines anderen Gases (z.B. Stickstoff). Das strömende Gas transportiert die Wärme anschließend auf die elektronische Baugruppe. Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten liegen hierbei zwischen $20 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ bis $100 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$. [93] Auf eine Baugruppe, welche die unterschiedlichen Heizzonen mit einer definierten Geschwindigkeit durchläuft, stellt sich ein entsprechendes Temperatur- oder Reflowlötprofil ein, wie es in Abbildung 2-26 exemplarisch dargestellt ist. Hier ist das erlaubte Prozessfenster für Bauelemente bei der Verarbeitung im Reflowlötprozess dargestellt. Für die gesamte Baugruppe (Komponenten, Lotwerkstoff, Substratmaterial) kann das resultierende Prozessfenster unter Umständen auch deutlich kleiner sein.

Zwangskonvektions- löten

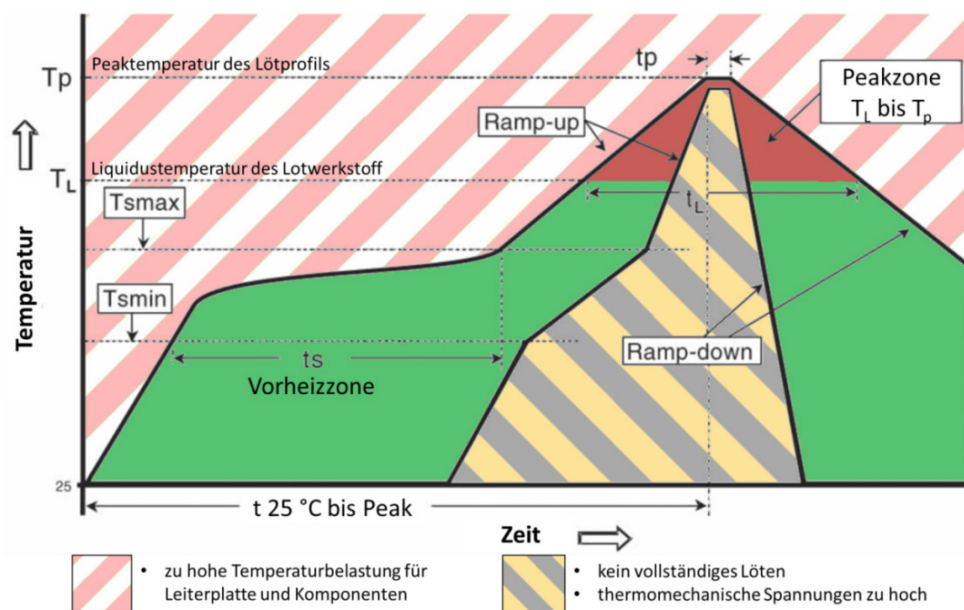


ABBILDUNG 2-26: VERANSCHAULICHUNG DES ERLAUTBEN PROZESSFENSTERS BEI EINEM TYPISCHEN TEMPERATURPROFIL FÜR DAS REFLOWLÖTEN (NACH [101])

Eine Reihe von Einflussfaktoren schränkt das zulässige Prozessfenster beim industriellen Weichlöten von Baugruppen stark ein. Ein wichtiger Faktor ist die thermische Masse sowie die örtliche Verteilung der Bauelemente. Die unterschiedlichen Wärmekapazitäten haben zur Folge, dass sich große, massereiche Bauteile sowie deren Umgebung langsamer im Lötprofil erwärmen als kleine Komponenten. Somit entsteht ein Temperaturgradient auf der Baugruppe. Das Prozessfenster ergibt sich aus den Bedingungen,

Thermisches Prozessfenster beim Reflowlöten

dass die Bauteile in den kühleren Bereichen noch zuverlässig verlötet werden sollen, ohne die Bauteile in den heißen Bereichen zu überhitzen.

Neben dem erlaubten thermischen Prozessfenster hat auch die Prozessdauer einen Einfluss. Damit hohe Wärmekapazitäten die erforderlichen Löttemperaturen erreichen, ohne dass gleichzeitig eine zu hohe Prozesstemperatur aufgewendet werden muss, benötigen diese hinreichend Zeit, um dem Profil ‚nachzulaufen‘. Herkömmliche Reflowöfen sind daher als langer Durchlaufofen und mit variierbarer Geschwindigkeit des Fördersystems konzipiert. Obwohl kurze Prozesszeiten aus wirtschaftlicher Sicht wünschenswert wären, würde der konvektive Energieeintrag zum Löten nicht ausreichen. Zudem können zu schnelle Temperaturänderungen Schäden durch thermomechanischen Stress in den Materialien der Baugruppe hervorrufen.

Eine Alternative zum üblicherweise eingesetzten Konvektions-Reflowlöten bildet das Kondensations- oder Dampfphasenlöten. Hier ergibt sich die Prozesstemperatur aus dem jeweiligen Medium, welches in einer Prozesskammer zum Sieden gebracht wird. Die in dem aufsteigenden Dampf gespeicherte Wärmeenergie wird anschließend an eine kältere Baugruppe abgegeben, welche von oben herabgesenkt wird. Durch diesen Kondensationsprozess kann die Wärme, mit ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen $300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ [102] bis $770 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ [103], [104], effizienter übertragen werden als durch Zwangskonvektion. Außerdem wird durch den vom Fluid abhängigen Siedepunkt eine Übertemperierung der Baugruppe ausgeschlossen. In [95] wird allerdings berichtet, dass die Lötstellen beim bleifreien Dampfphasenlöten eine geringere Scherkraft aufweisen als beim Konvektionslöten. Zudem ist die technische Umsetzung des Kondensationslötens aufwendiger und der Prozess lässt sich nur bedingt in eine Inlinefertigung integrieren.

Beim Vakuumlöten erfolgt die Übertragung der thermischen Energie durch Wärmeleitung von einer Heizplatte zur sich darauf befindenden zu verlötenden Baugruppe. Die Wärmeübertragung hängt von der Beschaffenheit der Grenzflächen und der Qualität des thermischen Kontaktes ab. Der Einsatz von gut wärmeleitenden Substraten, wie z.B. Keramik oder IMS, erleichtert den Transport der Prozesswärme an die Lotdepots. Bei Glasfaser-Verbundsubstraten, wie z.B. FR-4, kann der Prozess durch unzureichende thermische Übertragung gestört werden. Hier könnte eine integrierte Heizschicht zu einer gleichmäßigeren Erwärmung des Substrates beitragen. Da der gesamte Lötprozess in einer Vakuumkammer stattfindet, ist dieser Lötverfahren nur bedingt in Serienfertigungen integrierbar. Üblicherweise wird der Druck während des Lötprozesses nur zu bestimmten Zeiten im Lötprofil reduziert, z.B. bei der Aktivierung des Flussmittels und/oder beim Schmelzvorgang [105]. Um Oxidation zu vermeiden, wird

dazwischen z.B. mit Stickstoff gespült. Neben einem Lötprozess, der unter Ausschluss von Sauerstoff bzw. in inerter Atmosphäre stattfindet, liegt ein Vorteil des Vakuumlötlens in der Verringerung von Voids in den Lötverbindungen. [105]

2.2.3 ZUVERLÄSSIGKEIT VON ELEKTRONISCHEN BAUGRUPPEN

Zuverlässigkeit ist allgemein keine Eigenschaft eines einzelnen Produktes, sondern eine Wahrscheinlichkeit bezogen auf eine statistisch relevante Anzahl gleichartiger Produkte. Verschiedenste chemische und physikalische Einflüsse können sich unterschiedlich stark auf die Zuverlässigkeit eines Systems auswirken. Einen großen Einfluss hat an dieser Stelle die einem System ausgesetzte bzw. zugeführte thermische Energie. In Kombination mit dem weiteren Einflussfaktor Feuchtigkeit spricht man häufig von klimatischen Umwelteinflüssen.

Zuverlässigkeit

Das Einwirken von thermischen Belastungen beginnt bei elektronischen Komponenten (Leiterplatten, Lötverbindungen, Bauteilen,...) bereits im Fertigungsprozess und setzt sich im vergleichsweise langfristigeren Betriebszustand fort. Hierbei sind neben den Höchsttemperaturen auch die Zeiten entscheidend, wie lange eine Temperaturbelastung anhält und wie schnell sich eine Temperaturänderung vollzieht. In [106] werden thermisch bedingte Fehler daher unterteilt in Effekte hervorgerufen durch:

Arten der
thermischen
Belastung

- Stationäre Temperaturen
- Temperaturzyklen
- Temperaturgradienten
- Zeitabhängige Temperaturwechsel.

Infolge einer Erwärmung dehnen sich Stoffe aus. Für die Berechnung der geometrischen Änderungen im Festkörper gilt, ähnlich (Gl. 2-6), die Formel:

Wärmeausdehnung
allgemein

$$l(T) = l_0 \cdot [1 + \alpha_{CTE}(T - T_0)] \quad (\text{Gl. 2-12})$$

für die temperaturabhängige Änderung der Länge l . Im Falle einer isotropen Ausdehnung gelten analog für die Flächenausdehnung

$$A(T) = A_0 \cdot [1 + \alpha_{CTE}(T - T_0)]^2 \quad (\text{Gl. 2-13})$$

und

$$V(T) = V_0 \cdot [1 + \alpha_{CTE}(T - T_0)]^3 \quad (\text{Gl. 2-14})$$

für die Volumenausdehnung. Hierbei ist α_{CTE} der lineare Ausdehnungskoeffizient, welcher für Metalle näherungsweise umgekehrt proportional zur Schmelztemperatur T_S ist. [107] Es gilt

$$\alpha_{CTE} \sim \frac{1}{T_S} \cdot \quad (\text{Gl. 2-15})$$

In Tabelle 2-11 sind anhand von typischen Materialien aus dem Bereich der Elektronik deren unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten aufgeführt.

Wärmeausdehnung
in der Elektronik

TABELLE 2-11: VERSCHIEDENE THERMISCHE AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN AM BEISPIEL TYPISCHER MATERIALIEN AUS DER ELEKTRONIK [108], [109], [110], [111]

Komponente	Material	Ausdehnungskoeffizient $\alpha_{CTE} / 10^{-6} \cdot 1/K$
Substrat	FR-4	12 bis 16 (x-y-Richtung)
	Polyimid	40 bis 50
	Siliziumcarbid	3,5 bis 4,6
	Aluminiumnitrid	4,3 bis 4,7
	Aluminiumoxid	4,3 bis 7,4
	Glas	8,5
Leiter, Pads, Drähte	Aluminium	46,4
	Kupfer	16
	Gold	14,2
Gehäuse	Molding Masse	10 bis 30
Chip	Silizium	2,3 bis 4,7
	Galliumarsenid	5,4 bis 5,7
Lötverbindungen	SnPb37	25 (bei 25 °C)
	SnAg3Cu0,5	23,5
Widerstandsmaterial	Nickel-Phosphor	13 (bei 200 K) bis 14,5 (bei 400 K)

Die Folge unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten in einem komplexen System wie einer elektronischen Baugruppe sind Spannungen und Verformungen, welche in Abhängigkeit von thermischen Belastungen auftreten. Abbildung 2-27 verdeutlicht diese Abhängigkeit am schematischen Beispiel eines aufgelöteten Zweipolars auf einem Substrat mit einem 2 - 4fach höheren Ausdehnungsfaktor.

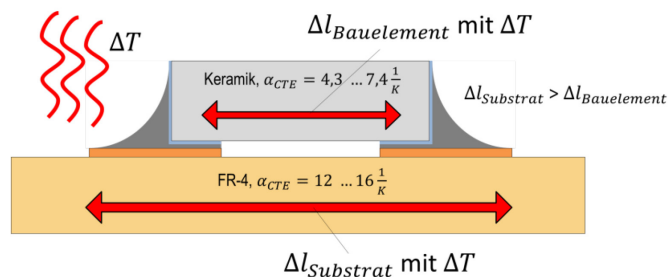


ABBILDUNG 2-27: PRINZIP DER THERMO-MECHANISCHEN ERMÜDUNG VON LÖTVERBINDUNGEN INFOLGE UNTERSCHIEDLICHER AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN

Um Aussagen über die Zuverlässigkeit eines Materials oder Systems im Bereich der Elektroniktechnologie treffen zu können, werden verschiedene Methoden und Modellberechnungen angewendet. Ein häufig genutztes Verfahren ist die thermisch beschleunigte Alterung von Testbaugruppen in Kombination mit analytischen Eigenschaftsmessungen. Mit dieser Methode werden innerhalb eines künstlich gerafften Zeitintervalls Ermüdungs- und Degradierungsmechanismen provoziert. Grundlage dieser Alterung ist zum einen die Beschleunigung von chemischen Prozessen mittels erhöhten Temperatur, welche sich über die Arrhenius-Beziehung

$$k = A_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{R_G \cdot T}} \quad (\text{Gl. 2-16})$$

ausdrücken lässt. Dementsprechend gilt für die Berechnung der Ausfallrate in der Zuverlässigkeitselektronik nach [112]

$$\lambda_A = B_P \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T}} \quad (\text{Gl. 2-17})$$

mit der Boltzmann-Konstante ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}}$), eines zu bestimmenden Proportionalitätsfaktors B_P und einer vorgangsabhängigen Aktivierungsenergie E_A . Nach [112] liegen die Aktivierungsenergien im Bereich zwischen 0,3 eV für Oxideffekte und 1,4 eV für Ionenmigration. Abbildung 2-28 veranschaulicht den qualitativen Abfall eines Eigenschaftswertes infolge einer thermischen Auslagerung.

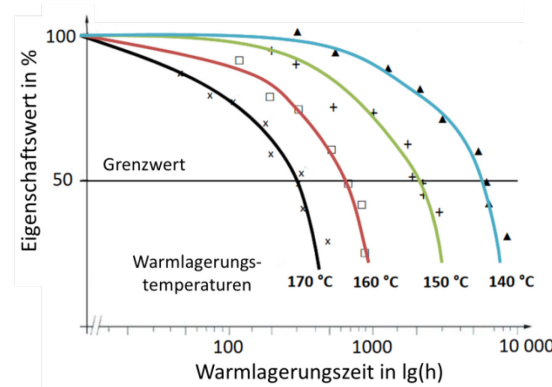


ABBILDUNG 2-28: ÄNDERUNG DER WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN BEI DER THERMISCHEN AUSLAGERUNG MIT VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN [89], [113]

Um die Lebensdauer von Lötverbindungen zu untersuchen, werden die entsprechend gelöteten Testbaugruppen verschiedenen zyklischen Belastungen im Rahmen von Temperaturwechseltests ausgesetzt. Im Allgemeinen liegen die Höchsttemperaturen solcher Tests im Bereich zwischen 80 °C bis 150 °C und die Tiefsttemperaturen meist im Bereich zwischen –40 °C und 0 °C. [114] Bei den zeitlichen Verläufen dieser Tests kann unterschieden werden zwischen Temperaturschocktests, bei denen die Aufheiz- und

Abkühlzeiten deutlich geringer sind als die Haltezeiten bei der jeweiligen Temperatur, und Temperaturwechseltests, bei denen keine Haltezeiten aber dafür längere Aufheiz- und Abkühlphasen auftreten. Ein Ergebnis der Temperaturwechseltests ist ein Beschleunigungsfaktor (BF), der das Verhältnis der Produktlebensdauer ($N_{f,Betrieb}$) bei normalen Betriebsbedingungen ($\Delta T_{Betrieb}$) zur Lebensdauer ($N_{f,Test}$) bei beschleunigten Testbedingungen (ΔT_{Test}) darstellt und in der Coffin-Manson-Gleichung:

$$BF = \frac{\Delta N_{f,Test}}{\Delta N_{f,Betrieb}} = \left(\frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Betrieb}} \right)^{CM} \quad (Gl. 2-18)$$

Anwendung findet. Dabei ist CM der Schädigungs- oder Coffin-Manson-Exponent, welcher empirisch oder mittels numerischer Modellierung bestimmt werden kann. [114] Mit Temperaturwechseltests an entsprechenden Prüfbaugruppen werden auf Grund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten Spannungen und Dehnungen im Lot erzeugt, die zu Ermüdungserscheinungen führen. Mit dem Coffin-Manson-Modell können die dazugehörigen mechanischen Fehlermechanismen, wie z.B. Risse, Brüche und Verformungen, vorherbestimmt werden. In der Elektroniktechnologie wird dieses Modell vielfach genutzt, um z.B. die Alterung von speziellen Lötstellen [115] bzw. bestimmten Lotmaterialien [116] zu analysieren. In [117] sind eine Reihe von Coffin-Manson-Exponenten aus verschiedenen Literaturquellen und Schadensanalysen zusammenfassend dargestellt.

Im Folgenden wird kurz auf die Scherfestigkeit von Fügeverbindungen eingegangen, welche einen typischen Eigenschaftswert bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen darstellt. Die Scherfestigkeit τ ist ein Maß für die Belastbarkeit einer Lötverbindung. Es gilt der Zusammenhang

Scherfestigkeit von
Lötverbindungen

$$\tau = \frac{F_{max}}{A} \quad (Gl. 2-19)$$

mit einer Kontaktfläche A bis zu einer maximalen Krafteinwirkung F_{max} . Bei Weichlötverbindungen lässt sich zwischen der Belastungsgrenze bei statischer Temperatureinwirkung (Kriechfestigkeit) und der Festigkeitsabnahme infolge einer dynamischen Temperaturbelastung (Rissbildung/Risswachstum) unterscheiden. Die Abnahme der Scherfestigkeit unter statischer Belastung ist vorrangig werkstoffabhängig und lässt sich durch die homologe Temperatur beschreiben, welche das Verhältnis von Einsatztemperatur zu Schmelztemperatur der jeweiligen Legierung angibt. In Abbildung 2-29 sind sowohl die allgemeine Festigkeitsabnahme eines metallischen Werkstoffes bei Temperaturbelastung als auch exemplarisch einige Scherfestigkeiten für verschiedene Lotlegierungen in Abhängigkeit ihrer homologen Temperatur dargestellt. Bei der dynamischen Belastung dominiert der Einfluss der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffi-

zienten, durch die es infolge der Wärmeausdehnung zur plastischen Deformation der Lötverbindung kommt.

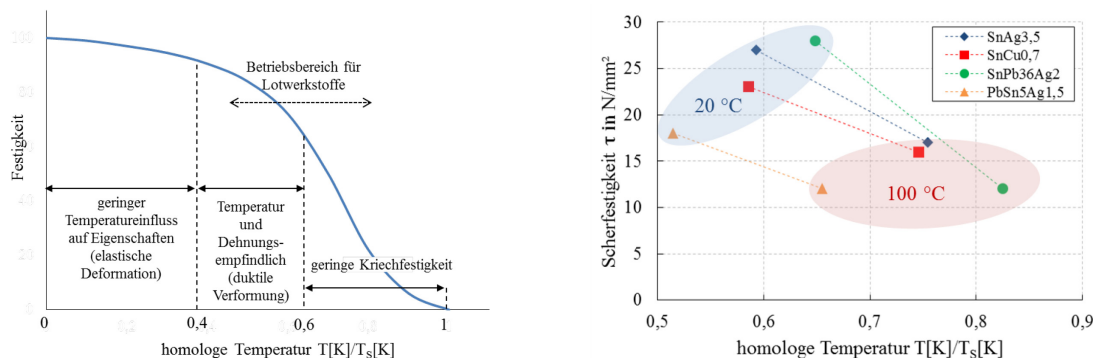


ABBILDUNG 2-29: FESTIGKEIT EINES METALLISCHES WERKSTOFFES IN ABHÄNGIGKEIT DER HOMOLOGEN TEMPERATUR (LINKS); SCHERFESTIGKEITEN VERSCHIEDENER LOTLEGIERUNGEN BEI 20 °C UND BEI 100 °C (NACH DATEN AUS [96]) (RECHTS)

Eine häufig angewandte Methode zur Bestimmung der unterschiedlichen Scherfestigkeiten, in Abhängigkeit ihrer Vorbelastungen, ist die Scherkraftmessung an geeigneten Aufbauten. Üblicherweise werden hierfür Testplatinen mit einer Reihe von kostengünstigen SMD-Zweipolern unterschiedlicher Baugröße und dem zu untersuchenden Lotwerkstoff hergestellt. Durch unterschiedliche Bauformen (z.B. 0402, 0805, 2512,...) erfolgt eine Variation der Verbindungsflächen, auf welche eine vorrangig uniaxiale Belastung bei dynamischer Beanspruchung wirkt.

Schertest

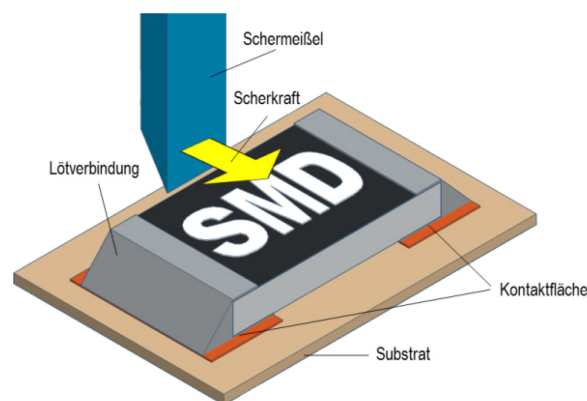


ABBILDUNG 2-30: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BELASTUNG VON LÖTSTELLEN AUF SCHERUNG AN EINEM SMD-ZWEIPOLER

In Abbildung 2-30 ist schematisch das Messverfahren der Scherfestigkeit an einem Zweipoler dargestellt. Mit einem gegen das Bauteil verfahrenen Schermeißel wird eine Kraft auf die Verbindungen ausgeübt. Überschreitet diese Kraft die Festigkeit des Verbindungssystems, bestehend aus Lötverbindung und den metallischen Fügeflächen auf Substrat und Bauteil, ist die Folge ein Abriss der Verbindung. Der Schertest ist

demnach eine zerstörende Prüfung, die unterschiedliche Fehlermechanismen aufzeigen kann. Der Ort und die Art des Bruches bestimmen den Fehlermechanismus und damit auch die Aussagekraft des Festigkeitswertes. Typische Fehlermodi, neben dem reinen Bruch im Lot, sind z.B. der Bruch im Trägermaterial des Bauelementes oder der Abriss der Metallisierung(en) bzw. eine Kombination von mehreren dieser und anderer Mechanismen.

Wässrige Betauungsfilme und erhöhte Luftfeuchtigkeit in der Umgebung haben auf elektronischen Baugruppen meist einen zuverlässigkeitsmindernden Einfluss. Um die Einflussfaktoren auf ein bestimmtes Produkt genauer zu bestimmen, werden klimatische Untersuchungen an Testbaugruppen in speziellen Klimakammern durchgeführt. Nach [118] finden folgende Verfahren in der Praxis Anwendung:

Feuchtigkeit und
Klimauntersuchungen

- Kalte Feuchte bei 25 °C und 97 % r. F.
- Warme Feuchte bei 40 °C und 93 % r. F.
- Heiße Feuchte bei 85 °C und 85 % r. F.
- Pressure Cooker/HAST bei 125 °C, 85 % r. F. und 0,2 hPa Druck
- Klimatische Wechselbelastungen.

Mit geeigneten Messverfahren können an den Testbaugruppen die feuchtabhängigen Eigenschaften in-situ oder im Anschluss an die Belastung ermittelt werden.

Über Diffusionsprozesse gelangt Wasser in Polymerstoffe. Auch FR-4-Laminat nehmen mit der Zeit Feuchtigkeit aus der Umgebung auf, was mit zunehmender Wasserbeladung einen Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Kenndaten hat. In Abbildung 2-31 ist zum Beispiel die Veränderung der Glasübergangstemperatur mit zunehmender Lagerzeit und Feuchtebeladung dargestellt. Durch eine gezielte Trocknung lässt sich diese Veränderung wieder umkehren.

Wasseraufnahme

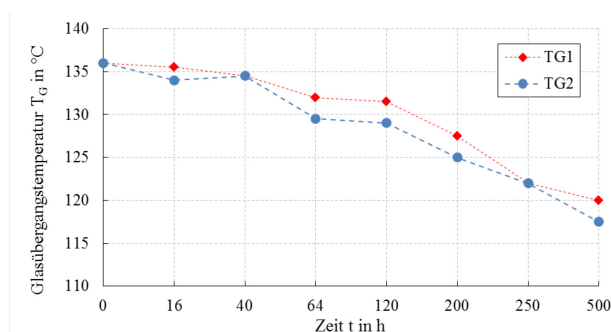


ABBILDUNG 2-31: VERÄNDERUNG DES T_G VON ZWEI VIERLAGIGEN FR-4-LAMINATEN INFOLGE DER WASSERAUFNAHME BEI DER LAGERUNG (NACH DATEN AUS [119])

Auf gleiche Weise nehmen auch die Kunststoffgehäuse von Bauelementen Feuchtigkeit aus der Umgebung. Diese Feuchtebeladung kann bei schnellen Temperaturan-

stiegen (z.B. im Lötprozess) dazu führen, dass die Materialien reißen oder aufplatzen, wenn die verdampfende Feuchtigkeit unter Druck schlagartig entweicht („Popcorn“-Effekt). Die Feuchtebelastung eines Objektes lässt sich gravimetrisch ermitteln.

An metallischen Oberflächen kann Feuchtigkeit Korrosionsschäden hervorrufen. Eine Betauung an elektrischen Strukturen kann außerdem zu Kriechströmen (z.B. an ionischen Rückständen) und Migrationsbrücken (gelöste Metallionen) führen, wodurch sich der Isolationswiderstand zwischen benachbarten Leitern verringert. Gelangt Feuchtigkeit in das Innere eines Glasfaserverbund-Laminates, kann es zu einer Sonderform der elektrochemischen Migration (CAF) entlang der Glasfasern kommen. [118] Mit entsprechenden elektrischen Messverfahren lässt sich die Abhängigkeit der Isolationswerte von der Feuchtigkeit ermitteln.

Feuchteinduzierte Migration

2.3 ENERGIE, WÄRMEENERGIE UND WÄRMETRANSPORT

Energie ist eine fundamentale physikalische Größe und wohl auch die allgegenwärtigste. „Es ist wichtig einzusehen, dass wir in der heutigen Physik nicht wissen, was Energie ist.“ [120] Mit diesem provokanten Zitat von Richard P. Feynman soll verdeutlicht werden, dass eine genaue Beschreibung von Energie komplex ist. Vielmehr handelt es sich hierbei um eine abstrakte und quantifizierbare Größe. Energie ist in allen Stoffen und Teilchen und lässt sich in eine Reihe unterschiedlicher Formen unterteilen (Abbildung 2-32).

Energie und Energieerhaltung

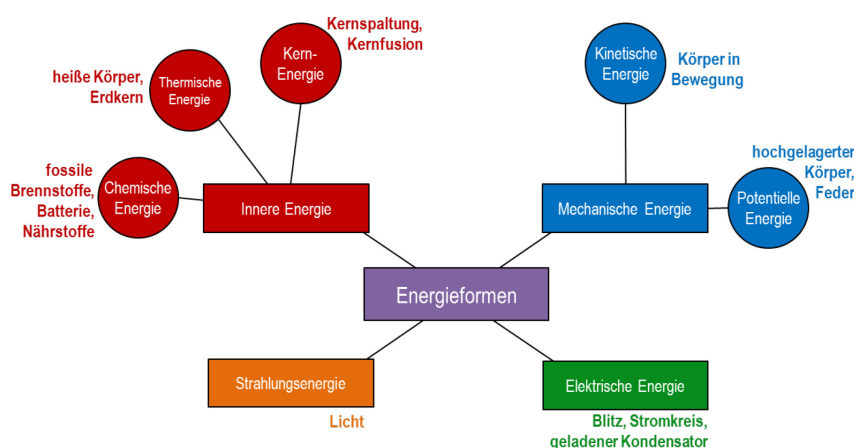


ABBILDUNG 2-32 ÜBERSICHT VERSCHIEDENER ENERGIEFORMEN MIT BEISPIEL [121]

Nach dem Energieerhaltungssatz ist die Änderung der Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems zeitlich invariant. Energie kann nicht erzeugt oder vermindert werden, sie kann jedoch von einer Energieform in eine andere Energieform umgewandelt werden. [122]

2.3.1 WÄRME UND TEMPERATUR

Wärme ist jegliche Energie, die von einem Gegenstand auf einen anderen übertragen wird, außer es handelt sich dabei um mechanische Arbeit. [123] Hierbei ist Wärme, als Form des Energietransportes über eine Systemgrenze, eine Prozessgröße. [124] Der Energieaustausch hat immer eine eindeutige Richtung, da Wärme immer vom System hoher zum System niedriger Temperatur transportiert wird. [125] Bei diesem Austausch wird stets ein thermisches Gleichgewicht angestrebt.

Wärmeenergie

Wieviel Wärmeenergie Q einem Stoffe zugeführt oder entzogen werden muss, um in diesem eine Temperaturänderung dT herbeizuführen, wird bestimmt durch dessen Wärmekapazität C . Es gilt

Wärmekapazität
allgemein

$$dQ = C \cdot dT \quad (\text{GL. 2-20})$$

Generell gilt, je mehr Atome ein thermischer Bezugsraum enthält, umso größer ist seine Wärmekapazität. [123] Die stofflichen Abhängigkeiten ergeben sich aus der spezifischen Wärmekapazität c und der Masse m des zu erwärmenden Stoffes. Unter homogenen Bedingungen gilt

$$dQ = c \cdot m \cdot dT \quad (\text{GL. 2-21})$$

Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes ist wiederum von dessen Temperatur abhängig, da sich infolge der thermischen Ausdehnung die Dichte des Stoffes ändert. Bei Festkörpern sind diese Änderungen relativ klein, so dass für einen begrenzten Temperaturbereich eine konstante spezifische Wärmekapazität angenommen werden kann. Eine Ausnahme bilden Phasenwechsel, welche eine deutliche Änderung der spezifischen Wärmekapazität hervorrufen.

Spezifische
Wärmekapazität

TABELLE 2-12: BEISPIELE FÜR SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄTEN VON TYPISCHEN ELEKTRONIKMATERIALIEN [108], [126]

	Spezifische Wärmekapazität c / J/(kg·K)
Aluminiumoxid	765
Aluminiumnitrid	745
Aluminium	900
Kupfer	385
Zinn	226
Epoxid+Glasgewebe	1000
Glas	800
Polyimid	1090
Silizium	702 - 712

Die Temperatur ist eine intensive Zustandsgröße und ihr Wert ist ein Maß für die innere Wärmeenergie eines Systems bzw. für die kinetische Energie der sich ungeordnet bewegenden Moleküle (Brownsche Bewegung). Im Verlauf des Grundlagenkapitels wurde bereits dargestellt, dass die Temperatur einen großen Einfluss auf die Eigenschaften und das Verhalten von Systemen und Prozessen hat. Viele physikalische Eigenschaften wie die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Prozesse, die thermische Ausdehnung von Substanzen, die Änderung des elektrischen Widerstandes oder der Zustand (Phase, Struktur) von Materie stehen in direktem Bezug zur Temperatur.

Temperatur und Einfluss

2.3.2 ARTEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG

Wird Wärme von einem Punkt oder Bereich hoher Temperatur zu einem Punkt oder Bereich geringerer Temperatur übertragen, bezeichnet man dies als Wärmeübertragung oder Wärmetransport. Dem Transport liegen die drei Mechanismen Wärmeleitung, Wärmekonvektion und Wärmestrahlung zu Grunde, wobei diese zumeist in Kombination auftreten.

Wärmeübertragungsmechanismen

Ein Wärmeaustausch infolge von Wärmeleitung ist an das Vorhandensein von Materie gebunden. Nach [127] erfolgt der Wärmetransport in Metallen durch sich schnell bewegende Leitungselektronen (Stöße mit Metallionen), wohingegen in Isolatoren dieser durch hochfrequente elastische Wellen (Gitterschwingungen) übernommen wird. In differentieller Form gilt für das Auftreten eines Wärmestroms \dot{Q} infolge eines Temperaturunterschiedes das Fouriersche Gesetz mit der vektoriellen Wärmestromdichte

Wärmeleitung

$$\vec{\dot{q}} = -\kappa \cdot \text{grad } T = -\kappa \cdot \nabla T \quad (\text{GL. 2-22})$$

und der Wärmeleitfähigkeit κ .

Im stationären Fall lässt sich (Gl. 2-22) für homogene Materialien zu

$$\dot{Q} = \kappa \cdot A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{d} \quad (\text{GL. 2-23})$$

vereinfachen. Abbildung 2-33 zeigt den Vorgang der Wärmeleitung durch ein mehrschichtiges Materialsystem, wie z.B. eine Leiterplatte bestehend aus Dielektrikum und Kupferauflage.

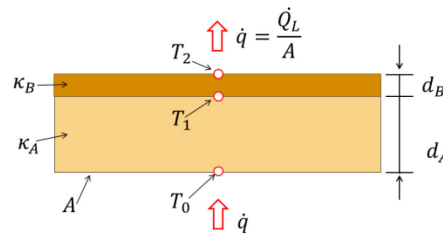


ABBILDUNG 2-33: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMELEITUNG DURCH VERSCHIEDENE SCHICHTEN (NACH [125])

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine materialspezifische Größe und somit ein Maß für die thermische Energie, welche durch eine vorhandene Geometrie in einem vorgegebenen Zeitintervall transportiert werden kann. Daten für Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Stoffe wurden bereits in Tabelle 2-2 und Tabelle 2-5 genannt. Diese können praktisch jedoch nur in einem engen Temperaturbereich als konstant angenommen werden, da die Wärmeleitfähigkeit eine temperaturabhängige Größe ist. In Abbildung 2-34 ist exemplarisch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit für Kupfer und für ein Epoxid dargestellt.

Wärmeleitfähigkeit

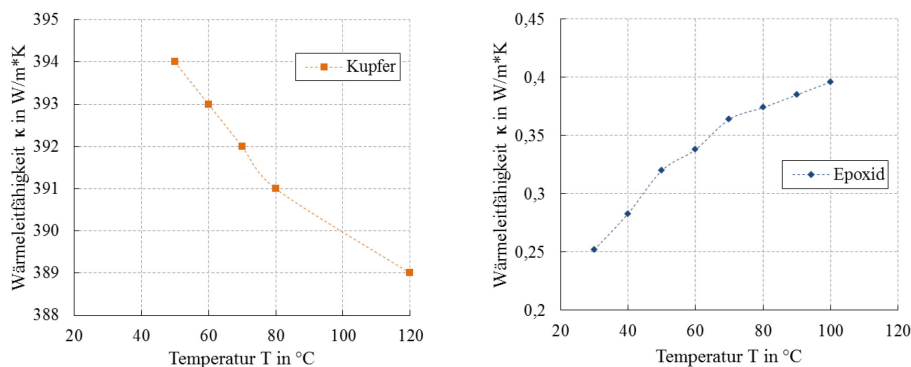


ABBILDUNG 2-34: EXEMPLARISCHE VERÄNDERUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR FÜR KUPFER (NACH DATEN AUS [128]) (LINKS) UND EIN EPOXID (NACH DATEN AUS [129]) (RECHTS)

Phasenwechsel haben hingegen einen großen Einfluss auf κ . Metalllegierungen haben im Vergleich zu ihren Legierungspartnern eine wesentlich schlechtere Wärmeleitfähigkeit, begründet in der Streuung von Elektronen an häufigeren Fehlstellen im Gitter. [126]

Konvektion tritt an den Grenzflächen zwischen einem festen Körper und einem Fluid (Gas oder Flüssigkeit) auf, wenn zwischen beiden ein Temperaturunterschied besteht. (Abbildung 2-35) In Fluiden besitzen die wärmetransportierenden Stoffteilchen (Atome oder Moleküle) höhere Freiheitsgrade als in Festkörpern. Daher lässt sich hier neben dem Mechanismus der molekularen Wärmeleitung zusätzlich ein an die Bewegung der Teilchen gebundener Wärmetransport (konvektive Wärmeleitung) beobachten. [125]

Konvektion

Der konvektive Wärmestrom \dot{Q}_K über eine Wandfläche A mit der Oberflächentemperatur T_K zu einem Fluid mit der Temperatur T_∞ ergibt sich aus

$$\dot{Q}_K = \alpha_K \cdot A \cdot (T_K - T_\infty) \quad (\text{GL. 2-24})$$

mit der Proportionalitätskonstante α_K als Wärmeübergangskoeffizient.

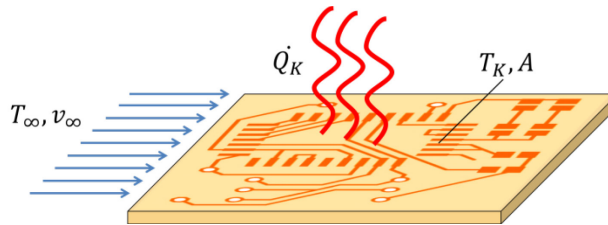


ABBILDUNG 2-35: KONVEKTIVER WÄRMETRANSPORT AN EINER OBERFLÄCHE (NACH [108])

Der Wert des Wärmeübergangskoeffizienten hängt von den Eigenschaften der thermisch betrachteten Grenzfläche wie Topographie, Abmaße und Temperatur ab. Ein weiterer Einfluss besteht durch die Art und Temperatur des angrenzenden Fluid, sowie im Besonderen durch dessen Strömungsfeld mit der Strömungsgeschwindigkeit v_∞ . Geht diese Geschwindigkeit gegen null, beziehungsweise wirken nur die thermischen Auftriebskräfte, so liegt eine natürliche oder freie Konvektion vor. Entsprechend der in Tabelle 2-13 dargestellten Beispiele sind hier die Koeffizienten vergleichsweise klein und es überwiegt der stoffliche Einfluss des Fluid. Im Gegensatz dazu ist der Wärmeübergang bei der erzwungenen Konvektion maßgeblich von der Fluidgeschwindigkeit abhängig. Auf die Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten soll hier verzichtet und stattdessen auf Beschreibungen in [124] oder [108] verwiesen werden.

Wärmeübergangskoeffizient

TABELLE 2-13: BEISPIELWERTE FÜR WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN [130], [123]

Mechanismus	Fluid (Oberfläche)	Wärmeübergangskoeffizient α_K / W/m ² ·K
Freie Konvektion	Luft (horizontale Fläche)	aufwärts: 5 - 10 abwärts: 2 - 5
	Luft (vertikale Fläche)	5,5
	Gase	2 – 25
	Flüssigkeiten	50 – 1000
Erzwungene Konvektion	Gase	25 – 250
	Flüssigkeiten	100 - 20000

Der Austausch von Wärmeenergie ohne thermischen Kontakt oder bei der Abwesenheit von Materie geschieht durch Wärmestrahlung. Im Gegensatz zum teilchengebundenen Energietransport der Wärmeleitung und der Konvektion erfolgt der Transport

Wärmestrahlung

hier in Form von elektromagnetischer Strahlung, wie zum Beispiel der Infrarotstrahlung (IR). Mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz lässt sich das Spektrum der Wärmestrahlung beschreiben, welche jeder Körper mit einer Temperatur über 0 K emittiert. [125] Mit dem vereinfachten Gesetz von Stefan-Boltzmann kann der Wärmestrom durch Strahlung \dot{Q}_S beim Austausch mit der Umgebungstemperatur T_U mit

$$\dot{Q}_S = \epsilon \cdot \sigma_B \cdot A \cdot (T_K^4 - T_U^4) \quad (\text{GL. 2-25})$$

berechnet werden. Hierbei ist ϵ der Emissionsgrad eines Körpers mit der Fläche A und der homogenen Temperatur T_K . Die Stefan-Boltzmann-Konstante ist hier $\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ und auf Grund der Potenzierung müssen die Temperaturen in Kelvin verwendet werden. Definiert man für (Gl. 2-25) einen radiativen Wärmeübergangskoeffizienten h_S nach [108] mit

$$h_S = \epsilon \cdot \sigma_B \cdot (T_K^2 + T_U^2)(T_K + T_U) , \quad (\text{GL. 2-26})$$

dann vereinfacht sich der Wärmestrom durch Strahlung zu

$$\dot{Q}_S = h_S \cdot A \cdot (T_K - T_U) . \quad (\text{GL. 2-27})$$

In Abbildung 2-36 ist schematisch der Wärmetransport durch Strahlung zwischen der Oberseite einer Platte und eines umgebenden Raumes dargestellt.

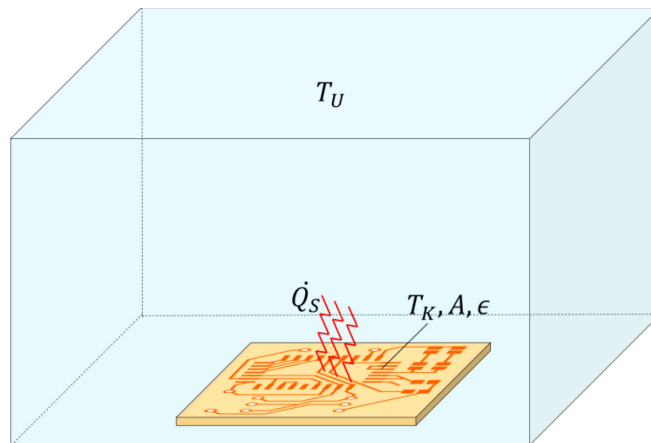


ABBILDUNG 2-36: WÄRMETRANSPORT DURCH STRAHLUNG ZWISCHEN KÖRPER UND UMGEBUNG (NACH [108])

Das Vermögen eines realen Körpers, Wärmestrahlung zu emittieren, lässt sich be-
 schreiben, indem man diese mit der Strahlung eines idealen schwarzen Körper ver-
 gleicht. Der schwarze Körper ist ein perfekter Emittor mit dem Emissionsgrad $\epsilon = 1$.
 Der Emissionsgrad realer Oberflächen liegt zwischen 0 und 1 und ist von der Wellen-
 länge und der Oberflächentemperatur abhängig. Berechnungsmodelle für den Emis-
 sionsgrad sind zum Beispiel in [108] beschrieben. Für diese Arbeit soll auf konstante
 Emissionsgrade aus Literatur und eigenen Messungen zurückgegriffen werden. Gene-

Emissionsgrad

rell gilt, dass dunkle, matte Oberflächen einen höheren Emissionsgrad nahe 1 haben, während metallisch glänzende Flächen weniger stark emittieren. Tabelle 2-14 beinhaltet einige typische Emissionsgrade für Oberflächen technisch relevanter Materialien.

TABELLE 2-14: EMISSIONSGRADE VERSCHIEDENER OBERFLÄCHEN FÜR IR-STRAHLUNG BEI RAUMTEMPERATUR [108]

Oberfläche	Emissionsgrad ϵ
Aluminium (poliert)	0,03
Aluminium (eloxiert)	0,84
Kupfer (poliert)	0,03
Kupfer (angelaufen)	0,75
Zinn (poliert)	0,05
Zinn (angelaufen)	0,32
FR-4	0,91 – 0,94

3. ERWÄRMUNG VON LEITERPLATTEN UND FÜGESTELLEN

In Kapitel 2 wurden technologische Aspekte der Leiterplatten- und Baugruppenfertigung, die Grundlagen der Thermodynamik sowie der Einfluss von Temperatur auf Elektronik dargestellt. Im weiteren Verlauf werden diese genutzt, um verschiedene Möglichkeiten und Methoden der Erwärmung von Leiterplatten und Baugruppen zu diskutieren. Des Weiteren wird anhand von Beispielen der Stand der Technik im Bereich von Erwärmungseinrichtungen vorgestellt, die auch für den Einsatz auf Leiterplatten in Frage kommen.

Inhalt des Kapitels

3.1 ERWÄRMUNGSVERFAHREN NACH DEM MECHANISMUS DER ENERGIEUMWANDLUNG

In diesem Abschnitt werden verschiedene Verfahren und Grundprinzipien beschrieben, anhand derer eine kontrollierte Erwärmung von Leiterplatten möglich ist. Zur besseren Übersicht werden diese nach ihrem Mechanismus der Energieumwandlung unterteilt. Nicht wiederholt werden hier die Verfahren, die für das Löten elektronischer Baugruppen bereits in Kapitel 2.2.2.3 vorgestellt wurden. Verzichtet werden soll außerdem auf Verfahren, die zwar theoretisch denkbar, aber aus verschiedenen Gründen nicht praktikabel für die hier untersuchte Anwendung sind, wie z.B. die Freisetzung von Wärme durch Kernspaltung.

Allgemeines

3.1.1 ELEKTRISCHE ENERGIE IN WÄRME

Laut [127] ist elektrische Energie die einzige Form der Endenergie, die zur Erzeugung aller Nutzenergien (Wärme, Kälte, Licht, Arbeit) in nennenswertem Umfang Verwendung findet. Die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme für das Beheizen von Leiterplatten einzusetzen, ist daher ein naheliegendes Verfahren. Es existiert eine Vielzahl elektrothermischer Verfahren, die sowohl im Alltag und im industriellen Umfeld vielfach Anwendung finden. Diese lassen sich sowohl nach der Bereitstellung der elektrischen Energie als auch dem Mechanismus der Wärmerzeugung unterteilen. In Tabelle 3-1 ist eine Übersicht der unterschiedlichen Verfahren zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme mit dem Ort der Energiewandlung dargestellt.

Arten der elektrischen Wärmerzeugung

TABELLE 3-1: ÜBERSICHT VERSCHIEDENER ELEKTROWÄRMEVERFAHREN NACH TECHNOLOGIE UND ORT DER ENERGIEWANDLUNG (NACH [127])

Technologie	Ort der Energiewandlung		Mechanismus des Energietransport	Anwendung
	Unmittelbar im Objekt	Mittelbar am Objekt		
Widerstandserwärmung	X		Elektrischer Strom	Lebensmittelindustrie [131]
		X	Konvektion	Heißluftofen
			Wärmestrahlung	Infrarotofen
			Wärmeleitung	Heizplatte
Induktive Erwärmung	X		Elektromagnetisches Wechselfeld	Induktionsschweißen
	o	X	Konvektion	Induktionsherd
Dielektrische Erwärmung	X		Elektromagnetisches HF-Feld	Mikrowellenofen
Lichtbogenerwärmung	X		Lichtbogenstrom	Gasreaktionsöfen
	o	X	Wärmestrahlung (Konvektion)	Lichtbogen-Stahlschmelzöfen
Plasmastrahlerwärmung	o	X	Konvektion	Plasmaschweißbrenner
Elektronenstrahlerwärmung	X		Beschuss mit Elektronen	Elektronenstrahlschmelzöfen
Laserstrahlerwärmung		X	Licht- bzw. Wärmestrahlung	Schneiden mit Laser

X – primär; o - sekundär

In Abbildung 3-1 sind die erwähnten Technologien anhand ihrer praktisch erreichbaren Leistungsdichten über die zu erwärmende Oberfläche dargestellt. Zur besseren Orientierung ist hier die Erwärmungsleistung als Geradenschar angegeben sowie der typische Größenbereich für Leiterplatten hinzugefügt. Nach dieser Einteilung aus [127] kämen die mittelbare (äußere) Widerstandserwärmung, die dielektrische Erwärmung sowie die induktive Erwärmung für das Beheizen von Leiterplatten in Frage.

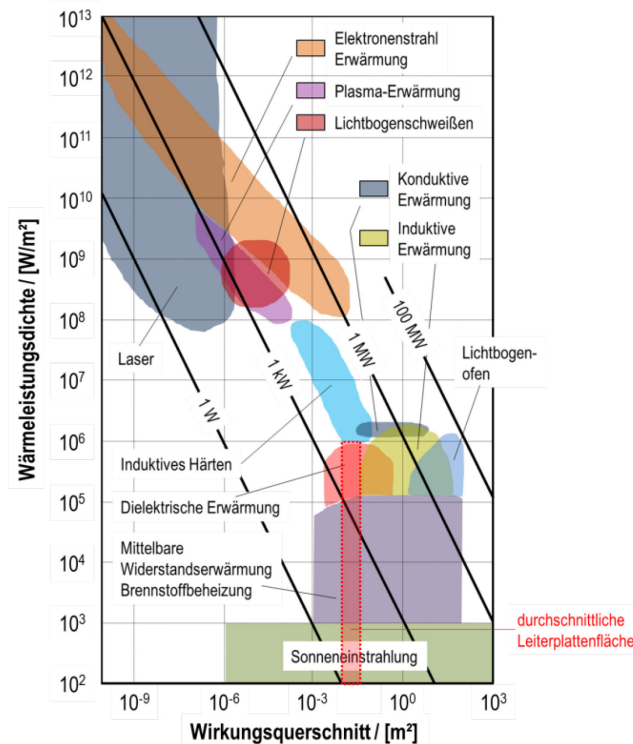


ABBILDUNG 3-1: LEISTUNGSDICHTEN UND WIRKUNGSQUERSCHNITTE VON ELEKTROWÄRMEVERFAHREN (NACH [127])

Die Widerstandserwärmung oder konduktive Erwärmung beschreibt die Erzeugung von Joulescher Wärme an einem elektrisch leitfähigen, stromdurchflossenen Körper. Das Prinzip ist praktisch die Umkehrung des in Abbildung 2-7 dargestellten Effektes der temperaturabhängigen Widerstandserhöhung. Die durch einen Leiter mit der elektrischen Leistung P beschleunigten Ladungsträger geben ihre Bewegungsenergie an dessen Gitteratome ab, die dort in Wärme umgesetzt wird. Die Leistung lässt sich mit dem Gesetz von Ohm nach

Joulesche
Erwärmung

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (\text{Gl. 3-1})$$

berechnen. Für die innerhalb einer Zeit dt umgesetzte Wärmeenergie gilt

$$dQ = P \cdot dt \quad (\text{Gl. 3-2})$$

Der Einsatz von Widerstandserwärmungen umfasst ein breites Anwendungsfeld mit einer großen Bandbreite an unterschiedlichen Heizstrukturen und Materialien. Generell lässt sich mit ausreichender Leistung jedes elektrisch leitfähige Material erwärmen. Begrenzt wird dies durch die thermische Beständigkeit (verbrennen, schmelzen, ...) des erwärmten Stoffes bzw. Stoffsystems. Für Heizanwendungen ist ein hinreichend großer spezifischer Widerstand von Vorteil, um die aufzuwendende Stromstärke gering zu halten. Daher werden entweder entsprechende Materialien (z.B. Graphit: $\rho = 8 \Omega\text{m}$) eingesetzt und/oder der absolute Widerstand wird durch geometrische Strukturierung

Material- und Struk-
tureigenschaften

(z.B. Heizwendel, dünner Heizdraht, dünne Heizschicht,...) angepasst. Für viele Anwendungen ist es außerdem regelungstechnisch von Vorteil, dass das Heizmaterial einen möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten innerhalb des benötigten Temperaturbereiches aufweist. Ein positiver Temperaturkoeffizient (PTC) hat außerdem eine selbst-limitierende Funktion, da bei konstanter Spannungsversorgung die Verlustleistung mit steigendem Widerstand sinkt. Zu typischen metallischen Heizleiterlegierungen (im Hochtemperaturbereich) gehören z.B. CrNi oder CrFeAl mit Einsatztemperaturen bis 1200 °C bzw. 1400 °C. [132] Für höhere Anwendungstemperaturen können auch keramische Werkstoffe wie SiC (bis 1600 °C) oder MoSi₂ (bis 1800 °C) eingesetzt werden. [132]

Auf der Leiterplatte sind die direkte Widerstandserwärmung von elektrisch belasteten Bauteilen und dadurch die indirekte Widerstandserwärmung der Umgebung quasi omnipräsent und erfordern zuweilen elaborierte Kühlkonzepte. Als nützliche Wärmequelle werden solche unregelmäßigen Verluste daher nicht betrachtet. Die Veröffentlichung in [133] zeigt, wie sich mit einem geschickten Design die Verlustleistungen gezielt nutzbar einsetzen lassen. In Abbildung 3-2 ist zu erkennen, wie die direkte Erwärmung von Chip-Widerständen genutzt wird, um ein Verbindungsmaterial (Fieldsches Metall: In₅₁Bi_{32,5}Sn_{16,5}; $T_S = 62\text{ °C}$ [133]) auf der gegenüberliegenden Substratseite aufzuschmelzen. Abbildung 3-2 (e) deutet dabei den (langen) Wärmepfad zwischen der direkten Erwärmung des Widerstandsfilms und des Nutzbereiches an.

Widerstandsbauelemente und Widerstandsmaterialien

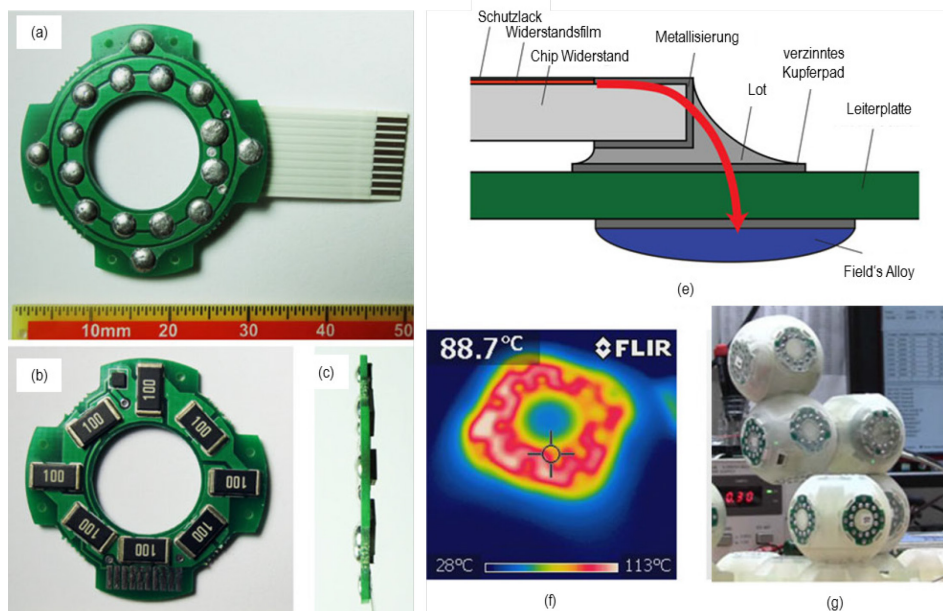


ABBILDUNG 3-2: SELBST-LÖTENDE-VERBINDUNGSELEMENTE MIT NIEDRIG SCHMELZENDEM LOTVORRAT AUF TOP-SEITE UND HEIZWIDERSTÄNDEN AUF BOTTOM-SEITE (A), (B) & (C); SCHEMA DES WÄRMETRANSPORTES DURCH DIE PLATINE (E); THERMOGRAFIEAUFNAHME DER PLATINE BEIM HEIZEN (F); LÖTMODULE WELCHE SICH INDIVIDUELL FÜGEN UND TRENNEN KÖNNEN (G) [133]

Die Widerstandsfilme von SMD-Chip-Widerständen lassen sich in Dickschichtmaterialien (Oxidpasten, Kohlegemisch- oder Cermet^V-Schichten) mit Schichtdicken zwischen 5 µm bis 50 µm und Dünnschichtmaterialien (Kohle-, Metall- oder Metalloxidschichten) mit Schichtdicken < 1 µm unterteilen. [107] Die Herstellung erfolgt entweder mittels Siebdruck (Dickschichtpasten) oder durch PVD-(physical vapour deposition) Verfahren (Dünnschicht) sowie einem strukturellen Abtrag (Trimmen) zur Einstellung des Widerstandswertes.

Vollflächige metallische Strukturen in Dünnschichttechnik sind in der Elektronik u.a. in Form von Widerstandsfolien im Einsatz. Diese sind von [134] erhältlich und als NiCr-, NiCrAlSi- und CrSiO-Schichten ausgeführt oder von [135] als NiP-Schicht erhältlich. Da diese Materialien speziell für den Einsatz auf Leiterplatten vorgesehen sind, werden sie als Beschichtung < 1 µm auf, in Leiterplattentechnik üblichen, Kupferfolien appliziert. Die Anwendungen dieser Folien liegen in der Verwendung als eingebettete passive Widerstände [136], [83] oder als elektromagnetisch abschirmende Strukturen [137]. Der Einsatz als elektrischer Widerstand auf Leiterplatten bietet Potential zur Verbesserung der Zuverlässigkeit durch die Einsparung von Lötstellen. Die Integration ins Innere trägt zudem zu einer Platzersparnis auf den Außenlagen bei. Laut Informationen von mehreren deutschen Leiterplattenlieferanten ist die Nachfrage jedoch gering, so dass die Technologie nicht standardmäßig angeboten wird.

Widerstandsfolien

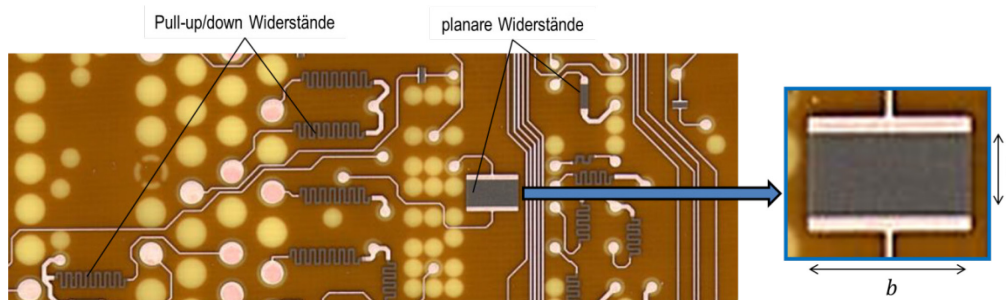


ABBILDUNG 3-3: BEISPIELANWENDUNG MIT EINER STRUKTURIERTEN WIDERSTANDSFOLIE AUF LEITERPLATTE [137]

Für derart dünne Widerstandsschichten nutzt man üblicherweise die Angabe des Flächenwiderstandes R_{\square} in Abhängigkeit von der Schichtdicke. Unter der Voraussetzung einer homogenen Schicht der Dicke d beschreibt R_{\square} den elektrischen Widerstand eines quadratischen Flächensegmentes ($l = b$). Für den Flächenwiderstand gilt mit (Gl. 2-4)

Elektrischer
Widerstand dünner
Schichten

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d} = R \cdot \frac{b}{l} \quad . \quad (\text{Gl. 3-3})$$

^V Verbundwerkstoffe aus keramischen Partikeln in einer metallischen Matrix (z.B. Cr/SiO)

Bei der Abscheidung von Metallen im Sinne der Dünnschichttechnik nimmt mit abnehmender Schichtdicke der Widerstand exponentiell zu. [36] Methoden zur Herstellung von Dünnschichtheizelementen werden in [138] beschrieben, indem diese mittels PVD-Verfahren auf Glassubstraten aufgebaut werden und in [139] wird eine Kombination von PVD-Aufbau und Laserstrahlabtrag auf Keramiksubstraten genutzt.

Da Widerstandsschichten nicht beliebig dünn gefertigt werden können, werden für hohe Widerstandswerte und/oder bei elektrisch hochleitfähigen Materialien diese häufig mäanderförmig strukturiert, um die Weglänge l zu erhöhen (vgl. (Gl. 2-4)). Die Anwendungen für metallische Heizwendeln sind vielfältig und reichen von groben Heizspiralen in Haushaltsgeräten bis zu feinadrigen Fensterheizungen. Für den individuellen und kompakten Einsatz ist eine Reihe dünner und flexibler Heizelemente verfügbar, welche aus einer metallischen Heizwendel und einem flexiblen Trägermaterial (z.B. Polyester, PTFE, Polyimid, Silikon) bestehen. In Abbildung 3-4 ist eine Auswahl von kommerziell erhältlichen flexiblen Heizelementen mit unterschiedlichen Trägermaterialien dargestellt.

Metallische
Heizelemente

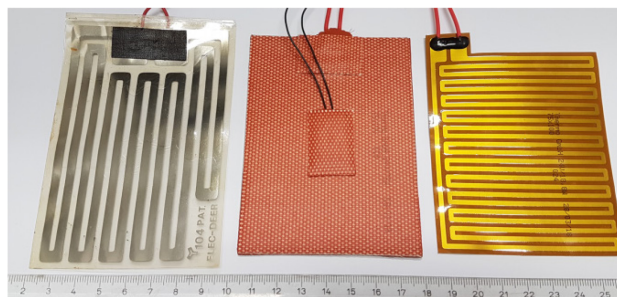


ABBILDUNG 3-4: BEISPIEL FÜR VERSCHIEDENE FLEXIBLE HEIZELEMENTE IN POLYESTER (LINKS); SILIKON (MITTE) UND POLYIMID (RECHTS)

Neben den bereits beschriebenen Heizmaterialien und Heizsystemen aus reinen Metallen und dünnen Schichten existiert eine Vielzahl von Dickschichtheizsystemen auf Basis gedruckter Pastengemische. Metallische Dickschichtheizer bestehen zum Beispiel aus Silber-, Platin- oder Palladium-Füllstoffen in einer Glasmatrix und werden häufig in Verbindung mit keramischen Substratmaterialien (z.B. AlN, Al₂O₃, LTCC, Quartz) eingesetzt. [140] Die Applikation erfolgt häufig durch Siebdruckprozesse mit anschließendem Einbrennen (Sintern) bei hohen Temperaturen (500 °C bis 1000 °C [141]). Eine weitere Gruppe bilden die polymeren Dickschichtheizer, die aus organischen Matrixmaterialien (z.B. Epoxid, Silikon,...) und (meist) aus kohlenstoffbasierten Füllstoffen (Ruß, Graphen, CNT's) bestehen. Die Applikation erfolgt ebenfalls standardmäßig über Siebdruck. Allerdings können diese Pasten auch auf vielen organischen Trägermaterialien (u.a. FR-4) eingesetzt werden, da die Aushärtung auf einer lösemittelbasierter Poly-

Gedruckte
Dickschichtheizer

kondensation oder einer Polyaddition (vgl. FR-4-Epoxidharz) basiert und damit eine geringere Temperaturanforderung (20 °C bis 200 °C) aufweist. [141] Die Konzentration der leitenden Substanzen im Matrixmaterial beeinflusst in hohem Maße die Leitfähigkeit, welche sich durch die Berührung benachbarter Partikel und die sich damit ergebenden leitfähigen Pfade ergibt. Der Bereich, in dem die Leitfähigkeit exponentiell mit zunehmenden Füllgrad ansteigt, nennt man Perkolation. Die exemplarische Abhängigkeit von Füllgrad zu mechanischer Festigkeit und elektrischer Leitfähigkeit ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

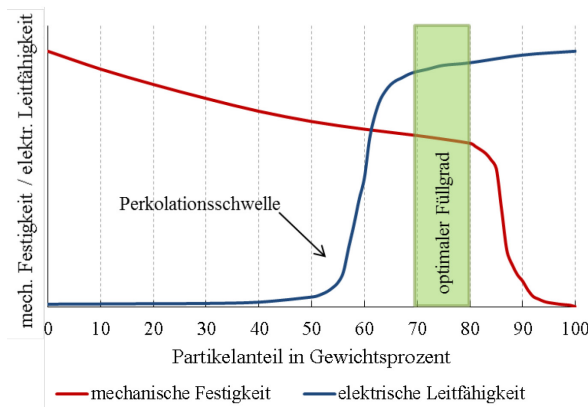


ABBILDUNG 3-5: ABHÄNGIGKEIT DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT UND DER MECHANISCHEN FESTIGKEIT EINER SCHICHT VON DER KONZENTRATION DER LEITFÄHIGEN FÜLLSTOFFE (NACH [141])

Der maximale Füllgrad ist hauptsächlich von der Struktur und der spezifischen Oberfläche der Partikel abhängig. [52] Für Kohlenstoff werden in [142] verschiedene Arten und Größen von Füllstoffen unterschieden. Im Bereich von Nanopartikeln sind dies z.B. Graphen, Ruß/Carbon-Black (10 nm bis 50 nm) sowie ein- und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen (1 nm bis 4 nm bzw. 6 nm bis 50 nm). Größere Ausprägung aus Graphit sind zum Beispiel Graphen-Plättchen (1 µm bis 60 µm) und Kohlenstofffasern (1 µm bis 10 µm). Ein Vorteil von polymeren Dickschichtheizern mit Carbon-Füllstoffen ist ihre Korrosionsbeständigkeit im Vergleich zu den metallischen Varianten. [140] Hinzu kommt die potentielle Eignung solcher Materialsysteme für Anwendungen, in denen eine Biokompatibilität erforderlich ist. [143]

Neben den bereits genannten Heizleiterlegierungen wird aus Kostengründen auch häufig Kupfer als Heizmaterial eingesetzt. Daher liegt es nahe, dass sich entsprechende Heizschichten auch auf Leiterplatte erstellen und einsetzen lassen. In mikrofluidischen Anwendungen aus [14] dienen Kupfermäanderstrukturen gleichzeitig als Heizelement und als seitliche Kanalgrenzen für ein durchströmendes nicht leitfähiges Fluid. Die Kombination von einem Heizer und dem konvektiven Wärmetransport durch ein angrenzendes Fluid eröffnet zumindest theoretisch die Möglichkeit einer besseren Wär-

Heizelemente in der
Leiterplatte

mespreizung im Leiterplattenmaterial. Eine praktische Umsetzung wäre jedoch mit einem gesteigerten technologischen Aufwand verbunden. Weitere Heizervarianten für den Einsatz in der Mikrofluidik sind z.B. in [144] mittels Heizdraht und in [13] mittels Dünnschicht-Heizelementen zum Betreiben von Membranen an Mikropumpen beschrieben. In verschiedenen Patenten werden Leiterplatten-Heizer auf Basis von Kupfer, Konstantan (CuNi44) oder einer anderen metallischen Schicht als eingebettetes Element im Basismaterial [145], [146] bzw. eingebettet in einen speziellen Interposer [147] beschrieben und deren Einsatz für Lötanwendungen diskutiert. Abbildung 3-6 zeigt beispielhaft zwei patentierten Heizsystemkonzepte in Leiterplatten.

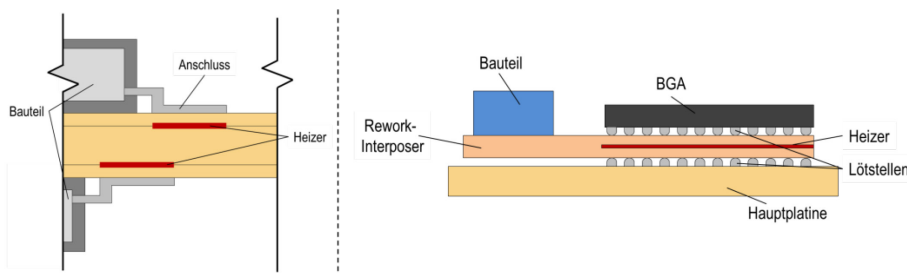


ABBILDUNG 3-6: PATENTIERTE KONZEPTE FÜR HEIZSYSTEME INTEGRIERT IN LEITERPLATTE; LINKS: LOCALE HEIZER UNTERHALB DER BAUTEILANSCHLÜSSE (NACH [145]); RECHTS: BEHEIZBARER INTERPOSER FÜR REWORK-AUFGABEN (NACH [147])

Neben dem bereits diskutierten Einlaminieren bestünde theoretisch auch die Möglichkeit, beheizbare Fasern oder dünne Drähte in das Gewebenetz eines Basismaterials einzuarbeiten. In [148] werden mittels automatisierter Sticktechnologie eingewebte flexible, elektrische Heizelemente hergestellt, die sich auf diese Weise in ein textiles Trägermaterial einbringen lassen. Es ist denkbar, dass die hier als Mäanderstruktur aufgetragenen hochflexiblen Heizleiter [148] maschinell in einen Glasfasermattenrohling eines Basismaterials eingearbeitet werden können. In [149] werden elektrisch leitfähige Fasern beschrieben, die mit einer dünnen Silberschicht überzogen sind, welche üblicherweise im Bereich der Textilelektronik Anwendung finden. Der Einsatz solcher Fasern als Widerstandsheizter ist denkbar, wurde in dieser Arbeit aber nicht praktisch untersucht.

Heizelemente im Gewebe der Leiterplatte

Die induktive Erwärmung beschreibt die Erzeugung von Joulescher Wärme durch im elektromagnetischen Feld induzierte Wirbelströme. Hierbei muss das zu erwärmende Objekt elektrisch leitfähig sein. Für eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen zur induktiven Erwärmung sowie deren Stand der Technik sei auf die entsprechenden Kapitel 4.1 und 4.2 verwiesen.

Induktive Erwärmung

Eine direkte Energieumwandlung in elektrisch isolierenden Materialien (z.B. Basismaterial) wäre, zumindest theoretisch, mit der dielektrischen Erwärmung durchführbar. Die

Dielektrische Erwärmung von Leiterplatten

Erwärmung wird hierbei durch Verschiebungsströme hervorgerufen. Diese entstehen durch die Einwirkung eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes auf elektrisch polarisierte Moleküle. [127] Man unterscheidet dabei zwischen der HF-Erwärmung im kapazitiven Feld und der Mikrowellen-Erwärmung im elektromagnetischen Strahlungsfeld. Die dielektrische Erwärmungsleistung hängt im Wesentlichen von der Frequenz und der elektrischen Feldstärke des Feldes sowie von den dielektrischen Verlustwerten des zu erwärmenden Stoffes ab. Grundsätzlich ist die dielektrische Erwärmung, z.B. von der Epoxidharz-Struktur einer Leiterplatte möglich. Die Kombination verschiedener Materialien stellt hierbei jedoch ein Problem dar. Vor allem metallische Strukturen einer Leiterplatte oder Baugruppe interagieren in besonderer Weise mit dem elektromagnetischen Feld. In [150] werden die Auswirkungen von Mikrowellen auf Kupferstrukturen von Leiterplattenproben simuliert und experimentell untersucht. Die Proben zeigen hierbei, in Abhängigkeit von der Frequenz sowie ihrer Geometrie, eine Eigenerwärmung infolge des Antenneneffektes. Dies führt zur Bildung von sogenannten „Hotspots“ (heiße Flecken) im Leitermaterial, welche weit über die Temperatur des umgebenden Dielektrikums hinausgehen und somit zu Schäden führen können. In dieser Arbeit wurde die dielektrische Erwärmung als Lösungsansatz nicht verfolgt.

3.1.2 STRAHLUNGSENERGIE IN WÄRME

Bei Strahlungsenergie handelt es sich um die Energie, die in Form von elektromagnetischen Wellen transportiert wird. Erwärmungsverfahren mittels Strahlung lassen sich anhand ihrer Wellenlängen im elektromagnetischen Spektrum einordnen. Langwelligere Verfahren, wie die Induktionserwärmung (50 Hz bis 1 MHz) oder die dielektrische Erwärmung (kapazitiv: 3 MHz bis 50 MHz; Mikrowellen: 0,3 Hz bis 300 Hz) [127], wurden bereits im vorherigen Abschnitt diskutiert. Ab einer Frequenz von 0,8 THz (entspricht einer atmosphärischen Wellenlänge von 375 μm) nehmen elektromagnetische Wellen den Charakter einer Temperaturstrahlung an. [127] In diesem Abschnitt soll daher kurz auf Erwärmungsverfahren, wie die Infrarot-, Laser-, und Elektronenstrahlerwärmung eingegangen werden, wobei letztere streng genommen den elektrischen Verfahren zuzuordnen ist.

Erwärmung mit
Strahlung

In Kapitel 2.3.2 wurde bereits beschrieben, dass jeder Körper Wärmestrahlung emittiert. Bei der Infraroterwärmung wird gezielt versucht, einen möglichst hohen Anteil an Wärmestrahlung auf das zu erwärmende Objekt zu transportieren. Üblicherweise wird dies mit Heizstrahlern oder Lampen erreicht, die vor allem Strahlung im oder nahe dem infraroten Spektrum aussenden. Da die Wärmeenergie in den Strahlern ebenfalls elektrisch erzeugt wird, ist der Wirkungsgrad von Infrarot-Heizern in der Regel kleiner

Infraroterwärmung

als bei der direkten elektrischen Erwärmung am Objekt. Infraroterwärmung tritt meist in Kombination mit anderen Wärmeübertragungsarten auf. Daher werden z.B. Konvektionsöfen mit speziell emittierenden und reflektierenden Oberflächen versehen, um die Wärmestrahlung der Heizstrukturen auf das Erwärmungsgut zu fokussieren. In der Aufbau- und Verbindungstechnik wird die Infraroterwärmung meist nur für selektive Erwärmungsaufgaben oder zur Unterstützung, wie z.B. beim Selektivlöten, genutzt. Zwar sind noch vereinzelt IR-Reflowanlagen im Einsatz, jedoch ist der Temperaturgradient auf den Baugruppen meist noch größer als bei Konvektionsöfen. [151] Allerdings werden in [152] Untersuchungen beschrieben, in denen durch die gezielte Erwärmung mit Wärmestrahlern unterschiedlicher Wellenlängen eine gleichmäßigere Erwärmung auf einer Testbaugruppe während des Lötprozesses erreicht werden konnte.

Für die Erwärmung mit Lichtstrahlen wird kurzwelliges Licht nahe dem infraroten Bereich mit einem halbelliptischen Spiegel gebündelt und über ein optisches System auf das Erwärmungsgut fokussiert. Im Fokuspunkt erfolgt die Umwandlung der Strahlungsenergie durch Absorption in Wärme. Die Leistung kann über die Intensität der Lichtquelle geregelt werden. Typische Durchmesser des Fokuspunktes sind mit etwa 2 mm bis 3 mm [86] relativ groß im Vergleich zu anderen Strahlungserwärmungsarten. Anwendung findet das Verfahren z.B. beim (sequentiell) selektiven Weichlöten. [86]

Lichtstrahlerwärmung

Im Vergleich zu anderen Strahlungsquellen handelt es sich beim Laser um Strahlung, die zeitlich und räumlich kohärent ist. Dadurch lässt sich eine hohe Leistungsdichte auf kleinsten Flächen fokussiert eintragen. Als Energiequelle dient hierfür ein Resonator, in dem sich ein optisch aktives Medium befindet, welches die Photonen erzeugt. Typische Laserarten sind CO₂-, Festkörper- oder Diodenlaser. Der Laserstrahl kann mit entsprechenden optischen Einrichtungen auf die zu erwärmenden Stellen umgelenkt und fokussiert werden. Der Energieeintrag wird auf kleinste Bereiche begrenzt und kann somit z.B. beim Laserlöten genutzt werden, um anderweitig schwer lötbare Materialien (z.B. Lote mit hohem Schmelzbereich) miteinander zu verbinden. Obwohl automatisierte Lasersysteme sehr schnell (Lötzeiten im Millisekundenbereich pro Verbindung [153]) arbeiten können, sind sie für globale Anwendungen meist zu aufwendig in der Realisierung und werden daher nur für spezielle Selektivaufgaben eingesetzt.

Laserstrahlerwärmung

Strahlungsbasierte Erwärmungsverfahren benötigen für die Erzeugung der Strahlung teils sehr aufwendige Anlagentechnik. Eine Integration in die Leiterplatte ist technisch kaum vorstellbar. Denkbar wäre höchstens eine Kombination von äußerer Strahlungsquelle (z.B. Licht oder Laser) und optisch zugänglichen, integrierten Strukturen, welche mittels Wärmespreizung die eingekoppelte Wärme in der Leiterplatte/Baugruppe verteilen. Derartige passive Heizstrukturen in Kombination mit diesen Verfahren sollen auf

Anwendbarkeit für Leiterplatten

Grund des technischen Aufwandes und ihrer Unwirtschaftlichkeit gegenüber anderen Verfahren hier nicht weiter betrachtet werden.

3.1.3 MECHANISCHE ENERGIE IN WÄRME

Die Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie ist ein klassischer Prozess, wie er zum Beispiel beim elektrischen Generator (Induktion) oder für in [154] beschriebene Energie-Harvester im Smart-Textil-Bereich genutzt wird. Grundprinzip hierfür ist der Piezoeffekt, der bei Materialien mit einer speziellen Domänen-Struktur (z.B. Bariumtitanat, Quarz, Bleizirkonat- Titanat,...) auftritt. Wird dieses Material mechanisch belastet, so führt die Verformung zur Trennung der positiven und negativen Ladungen des polaren Werkstoffes. [36] Das Resultat ist eine elektrische Spannung von den Körperoberflächen des Piezomaterials. Hieraus ließe sich dann wieder elektrothermisch Wärme erzeugen. Eine direkte Umwandlung von kinetischer und/oder potentieller Energie in Wärme tritt vornehmlich bei Reibungsprozessen auf. Ein bekanntes Beispiel ist die Erwärmung von Bremsscheiben im Automobil, bei welcher ein Teil der Bewegungsenergie als Reibungswärme dissipiert wird.

Wandlung mechanischer Energie

Zur kontrollierten Wärmeerzeugung durch mechanische Energie wird häufig Ultraschall (US) genutzt. Ultraschall bezeichnet hochfrequente Schwingungen, deren Frequenzen typischerweise zwischen 20 kHz bis 35 kHz liegen. Im Objekt breitet sich Ultraschall meist in Form von Longitudinalwellen aus, deren Absorption mittels Phononen Wärmeenergie im Material hervorruft. Mechanismen wie Molekular- und Grenzflächenreibung rufen in Abhängigkeit vom jeweiligen Material eine lokale Erwärmung durch den eingekoppelten Ultraschall hervor.

Erwärmung durch Ultraschall

Im Bereich der Fügeverfahren wird Ultraschall zum Beispiel für das Ultraschallschweißen oder Ultraschallbonden verwendet. Durch die mechanische Einwirkung der Schwingung werden Oxidschichten zerstört und Metallverzahnungen erreicht. Dies erlaubt die Verwendung von schwer fügbareren Kontaktpartnern wie z.B. Aluminium [155]. Nach [156] dominiert das Ultraschall-Drahtbonden als Kontaktierungsmethode mit rund 90 % den Markt der Halbleiterverbindungstechniken aufgrund der hohen Kosteneffektivität und der großen Flexibilität.

Ultraschallerwärmung in der Füge-technik

Auch für das Löten auf elektronischen Baugruppen kann Ultraschall eingesetzt werden. Übliche US-Lötsysteme basieren auf einer selektiven und direkten Ankontaktierung des (flüssigen) Lotdepots und somit einer wirkungsnahen Schwingungsübertragung. Durch das mechanische Aufbrechen von Oxidschichten kann mit diesem Verfahren nahezu korrosions- und flussmittelfrei gelötet werden. Angewendet wird US-Löten vor allem für schwer lötbare Oberflächen wie z.B. Keramik, Aluminium und Glas. In [95] wird ein

Löten auf Leiterplatte mittels Ultraschallerwärmung

Lötverfahren vorgestellt, bei dem Ultraschall in Kombination mit einer konvektiven Vorheizung eingesetzt wird. Die Erwärmung entsteht direkt in der Leiterplatte, die, wie in Abbildung 3-7 (oben links) zu sehen, zwischen einem Gegenhalter und der Sonotrode des Ultraschallgenerators eingespannt wird. Im Infrarotbild von Abbildung 3-7 ist die US-Erwärmung der starren Leiterplatte nach einer Zeit von 114 s bei einer Frequenz von 35 kHz zu erkennen.

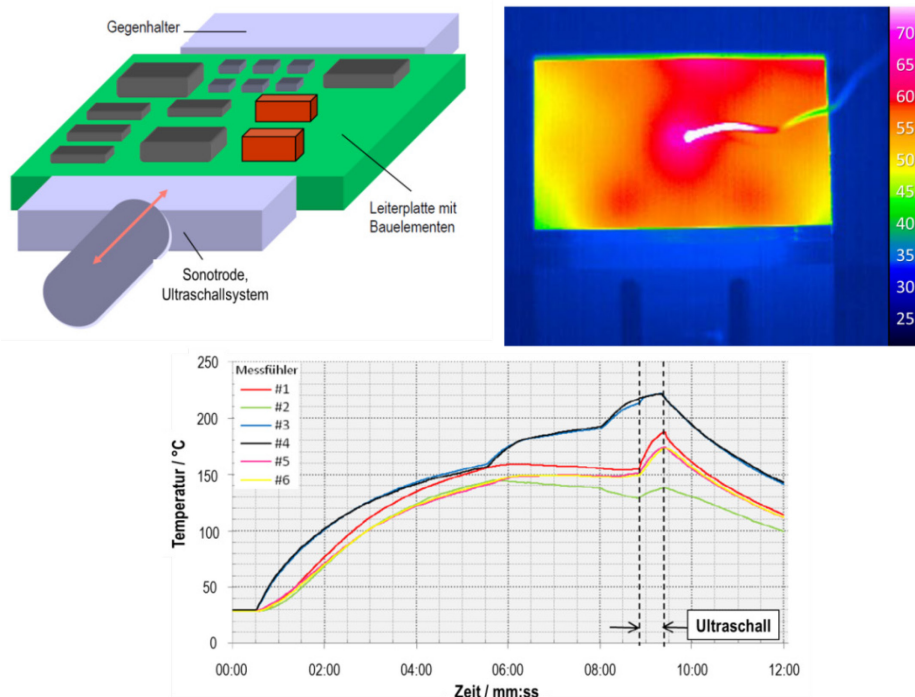


ABBILDUNG 3-7: ULTRASCHALLLÖTEN AUF LEITERPLATTE AUS [95] OBEN LINKS: PRINZIPIELLER AUFBAU DES ULTRASCHALL-LÖTSYSTEMS; OBEN RECHTS: US-ERWÄRMUNG EINER LEITERPLATTE BEI 35 KHz NACH 114 S; UNTEN: TEMPERATURPROFILE BEIM LÖTEN, GEMESSEN AN VERSCHIEDENEN STELLEN AUF DER LEITERPLATTE

An dem vorherigen Beispiel lassen sich bereits die technischen Einschränkungen erkennen. Die möglichst verlustarme Übertragung der mechanischen Schwingung in das zu erwärmende Objekt erfordert eine Einrichtung zur Schwingungserzeugung, die in direktem Kontakt z.B. mit der Leiterplatte steht, wodurch die Flexibilität der Nutzung eingeschränkt wird. Des Weiteren ist die Methode von der Schwingungsausbreitung im angeregten Körper abhängig. Die Ausbreitung im Festkörper ist vor allem von dessen Elastizitätsmodul E_M und Dichte ρ_D abhängig. [157] In einem komplexen Stoffsystem wie der Leiterplatte, variieren diese Größen (z.B. Kupfer^{VI}: $E_M = 130 \text{ Pa}$; $\rho_D = 8,92 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$; FR-4 Basismaterial: $E_M = 22 \text{ Pa}$; $\rho_D = 2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ [158]). Das hat eine stark invariante Ausbreitung der Longitudinalwellen und damit eine inhomogene Erwärmung zur Folge.

Diskussion

^{VI} Periodensystem von www.webelements.com

3.1.4 CHEMISCHE ENERGIE IN WÄRME

Eine Form der inneren Energie ist die chemische Energie, die in chemischen Verbindungen, wie z.B. Nährstoffen oder fossilen Brennstoffen gespeichert ist. Die Energieumwandlung geht hier mit dem Ablaufen von chemischen Reaktionen einher. Es wird unterschieden zwischen exothermen Reaktionen, in deren Verlauf chemische Energie in Form anderer Energiearten frei wird und endothermen Reaktionen, für deren Ablauf fortwährend Energie zugeführt werden muss. [159] In vielen Fällen ist diese andere Energieform Wärmeenergie.

Chemische Energie
und Reaktionsarten

Anwendung findet dies zum Beispiel bei thermochemischen Wärmespeichern, wie dem Sorptionsspeicher. Diese Speicher sind in der Lage, Wärmeenergie reversibel in chemische Energie umzuwandeln und zu speichern. In [19] wird ein Verfahren vorgestellt, bei welchem eine wasserspeichernde Beschichtung mittels Sorptionswärme einen Kühleffekt auf elektronischen Baugruppen ermöglicht. (Abbildung 3-8)

Thermochemischer
Wärmespeicher

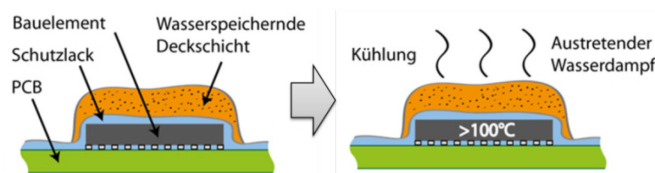


ABBILDUNG 3-8: PRINZIPSKIZZE EINES ENTWÄRMUNGSKONZEPTEES AUF BASIS EINES SORPTIONSSPEICHERS [160]

In Abbildung 3-9 ist dieser Effekt am Beispiel einer Temperaturmessung an unterschiedlich beschichteten SMD-Zweipolern zu erkennen. Während hier die Paraffinwachsbeschichtung als Latentwärmespeicher [161] fungiert, sind die Temperaturänderungen am Kieselgel auf chemische Reaktionsvorgänge infolge der Adsorption und Desorption von Wasser zurückzuführen. Zunächst erfolgt ein endothermes Desorbieren eingelagerter Wassermoleküle infolge einer äußeren Temperaturerhöhung. Umgekehrt erfolgt bei externer Abkühlung eine Adsorption von Wasserdampf aus der Umgebung unter exothermer Energiefreisetzung (Verdampfungsenthalpie). Dieser Prozess ist ein Beispiel für die Umwandlung chemischer Energie in Wärme. Für die in dieser Arbeit angestrebte Lösung ist diese Methode jedoch ungeeignet. Einerseits erfordert ein reproduzierbarer Prozess eine zusätzliche externe Wärmezufuhr und zum anderen sind die erreichbaren Energiedichten nicht hoch genug [19], um die hier angestrebten Temperaturen zu erreichen.

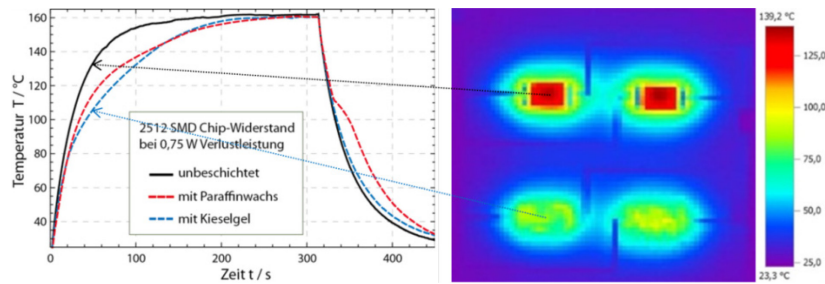


ABBILDUNG 3-9: AUFHEIZCHARAKTERISTIK EINES 2512-SMD-CHIP-WIDERSTANDES MIT UND OHNE SORPTIONSSPEICHER (KIESELGEL) (LINKS); THERMOGRAFIEAUFNAHME VON BESCHICHTETEN UND UNBESCHICHTETEN TEST-WIDERSTÄNDEN WÄHREND DES BETRIEBES MIT EINER VERLUSTLEISTUNG VON 0,75 W PRO ELEMENT (RECHTS) [160]

Ein weiteres Beispiel für exotherme Energiefreisetzung sind reaktive Multilayer-Folien wie sie z.B. in [162], [163] und [164] vorgestellt werden. Derartige Folien bestehen aus tausenden nanoskaligen Schichten, die alternierend aus zwei Materialien aufgebaut sind. [163] In der Literatur beschriebene Folien bestehen aus einer abwechselnden Schichtung von Nickel- und Aluminiumlagen, welche jeweils zwischen 25 nm bis 90 nm dick sind. Die reaktiven Folien finden gegenwärtig Anwendung bei speziellen Fügeverfahren in der Elektroniktechnologie. Bei derartigen Schichtstrukturen kommt es infolge einer thermisch induzierten atomaren Diffusion zu einer Freisetzung von Wärme. [164] Abbildung 3-10 skizziert die Anwendung und den Reaktionsablauf für den Fügeprozess eines Kühlkörpers. In [163] werden weitere Fügeanwendungen auf elektronischen Baugruppen durch den Einsatz von Lotformteilen auf Basis reaktiver Mehrlagensysteme beschrieben.

Reaktive Folien

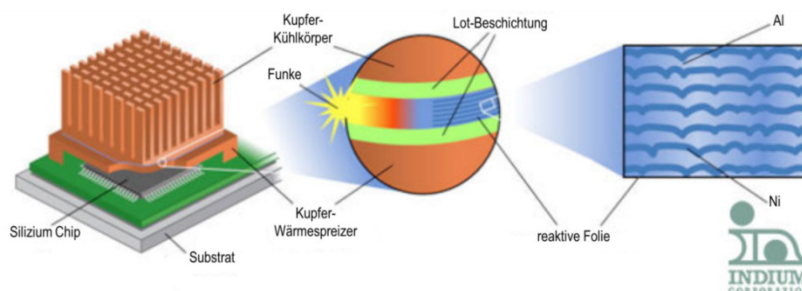


ABBILDUNG 3-10: SKIZZE EINER REAKTIVEN FOLIE UND DEREN REAKTIONSABLAUF [165]

Für den großflächigen Einsatz auf einer kompletten Baugruppe sind solche reaktiven Lotfolien jedoch ungeeignet. Zum einen würde die selektive Applikation einen hohen prozesstechnischen Aufwand bedeuten und zudem wären die Kosten, die mit der aufwändigen Herstellung verbunden sind, unverhältnismäßig gegenüber dem Nutzen als einmalige Energiequelle zum globalen Löten.

Anwendbarkeit

Eine ähnliche Nutzung von exothermer Energiefreisetzung wurde in einem in [24] beschriebenen Forschungsvorhaben untersucht. In diesem wurde ein reaktives Pasten-

Reaktive Pasten

material entwickelt, das als zusätzliche Energiequelle während des Reflowlötprozesses dient. Die reaktiven Komponenten wurden so angepasst, dass die exotherme Energiefreisetzung 10 K bis 20 K vor dem Schmelzbereich einer Standard SAC305 ($\sim 217^\circ\text{C}$) Lotpaste stattfindet. Damit lässt sich die Zündung über das Temperaturprofil des Reflowofens steuern. Die Bindung der reaktiven Komponenten in einer pastösen Mischung erlaubt zudem die Applikation mittels Schablonendruckprozessen. In Abbildung 3-11 ist der exotherme Lötprozess am Beispiel eines BGA dargestellt, da diese Bauformen durch ihre konvektiv abgeschatteten Lotkugeln häufig problematisch in konventionellen Reflowprozessen sind. Das reaktive Pastengemisch wird hier auf die Rückseite des Substrates appliziert, wobei die thermische Anbindung über thermisch leitfähige Durchkontaktierungen (thermal VIAs) erfolgt.

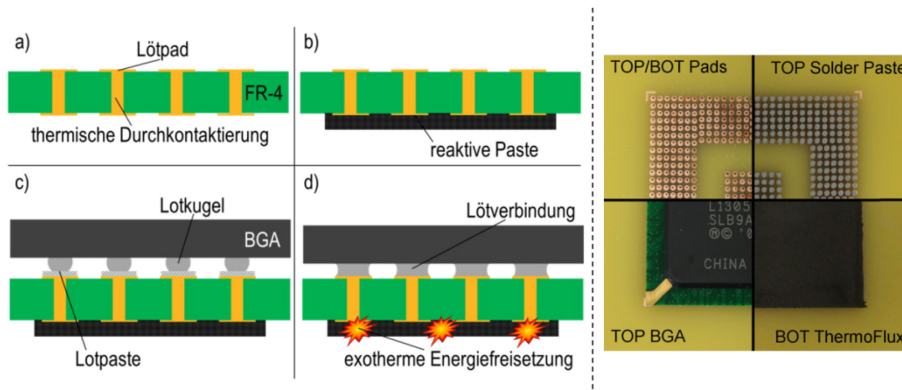


ABBILDUNG 3-11: PRINZIPABLAUF FÜR EINEN UNTERSTÜTZTEN LÖTPROZESS MIT EINEM REAKTIVEN PASTENDEPOT AUF LEITERPLATTE (LINKS) [24]; BEISPIEL ZUM REAKTIV UNTERSTÜTZTEN LÖTEN AN EINEM BGA (RECHTS) [166]

Auch die Herstellung von Preforms aus reaktivem Material sowie deren direkte Applikation neben den Lotdepots (Abbildung 3-12) wurden untersucht. Hierdurch wird ein aufwendiger zweiter Druckprozess gespart, welcher nach dem Lotpastendruck erfolgen müsste. Die thermische Anbindung der exothermen Energiequellen erfolgt konduktiv durch Kupferbahnen neben den Lotdepots.

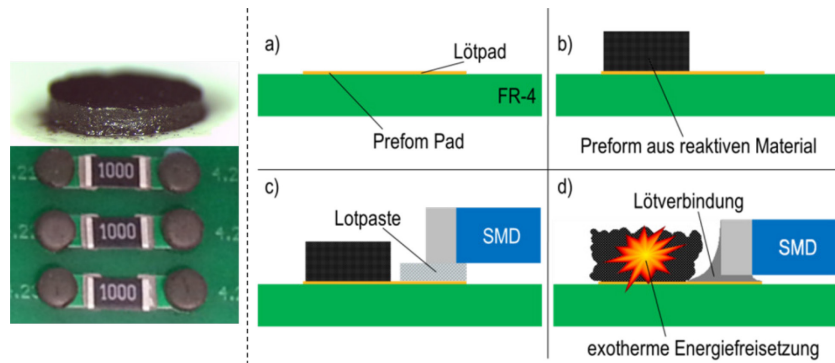


ABBILDUNG 3-12: PREFORMS AUS REAKTIVEM MATERIAL (LINKS); PRINZIPABLAUF FÜR EINEN UNTERSTÜTZTEN LÖT-PROZESS MIT REAKTIVEN PREFORMS AUF LEITERPLATTE (RECHTS) [24]

Das größte Problem bei der Nutzung der chemisch reaktiven Materialien sind die Rückstände des Reaktionsprozesses. Diese verteilen sich bei den kurzen (1 s bis 2 s) und energiereichen ($1 \frac{\text{J}}{\text{mg}}$ bis $2 \frac{\text{J}}{\text{mg}}$) Reaktionen, infolge einer explosionsartigen Ausdehnung, großflächig um das Pastendepot. Möglichkeiten zur Eindämmung der Rückstandverteilung bietet zum Beispiel der in Abbildung 3-13 dargestellte Einsatz von Hülse, welche die chemischen Komponenten einkapseln und die Rückstände auf der Baugruppe so minimieren.

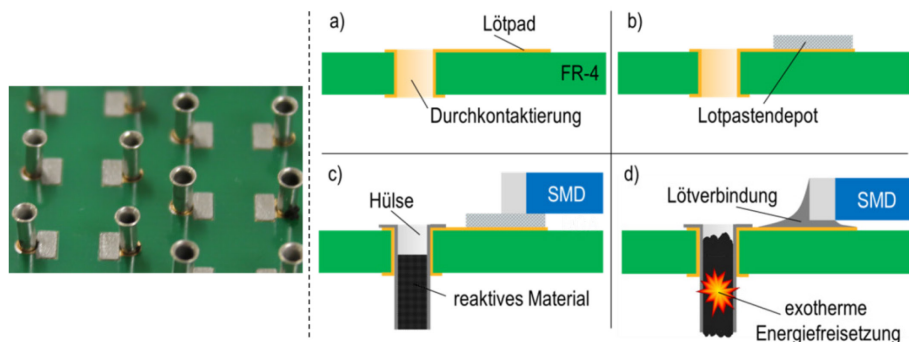


ABBILDUNG 3-13: MIT REAKTIVEM MATERIAL GEFÜLLTE HÜLSEN (LINKS); PRINZIPABLAUF FÜR EINEN UNTERSTÜTZTEN LÖTPROZESS MIT EINGEHÜLSTEM REAKTIVEM MATERIAL AUF LEITERPLATTE (RECHTS) [24]

Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von exotherm reagierenden Pasten, Preforms oder gefüllten Hülse können bei geschickter Applikation für den globalen oder selektiven Lötprozess einer Reihe von Bauteilen auf elektronischen Baugruppen eingesetzt werden. Hierbei kann diese Technologie aber nur eine einmalige sowie unterstützende Komponente des Lötprozesses sein. Die Initiierung der Reaktion erfordert zudem eine zusätzliche externe Energiezufuhr. Zudem bleibt die Notwendigkeit, eventuelle Rückstände gründlich zu beseitigen.

Anwendbarkeit

3.2 THERMISCHES VERHALTEN VON LEITERPLATTEN MIT INTEGRIERTEN HEIZSTRUKTUREN

Es wurde in den Grundlagen bereits beschrieben, dass FR-4 der am weitesten verbreitete Basismaterialtyp von elektronischen Baugruppen ist. Dies, in Verbindung mit steigenden Leistungsdichten und höheren thermischen Anforderungen an die Elektronik, bringt das Material häufig bis an die Grenzen seiner Belastungsfähigkeit. Daher verwundert es nicht, dass sich viele Untersuchungen mit der detaillierten thermischen Qualifizierung von FR-4 befassen, welches immer noch ein integraler Bestandteil des Wärmemanagement einer Baugruppe ist. So finden sich zum Beispiel in [167] Vorschläge für ein effektives thermisches Design von Leiterplatten. In [168] werden Berechnungsmodelle zur Bestimmung der kumulativen Wärmeleitfähigkeiten einer ML-Leiterplatte unter anderem in Abhängigkeit von Lagenanzahl und Kupferanteil präsentiert. Die Studie zeigt einen großen Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die thermischen Leitfähigkeiten, die von $0,42 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ in der z-Achse bis hin zu $17,62 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ in der x-y-Ebene reichen. Eine ähnliche Studie in [169] bestätigt diese hohe Anisotropie von FR-4-Leiterplatten anhand von praktisch ermittelten Messdaten. Hier liegen die Grenzwerte bei $0,32 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ in der z-Achse und bei $35,7 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ in der x-y-Ebene der Platine. Weitere Untersuchungen zur effektiven Wärmeleitfähigkeit von ML-Leiterplatten finden sich in [170] und [171]. In Letzterer wird zudem eine Möglichkeit zur gezielten Beeinflussung der Wärmeverteilung durch speziell strukturierte Kupferebenen vorgestellt.

Thermische Analyse-
studien zu
Leiterplatten

Der Fokus dieser Arbeit liegt, wie schon beschrieben, auf der technologischen Qualifizierung von integrierten Heizstrukturen. Dennoch soll in diesem Abschnitt auf einige vereinfachte Rechengrundlagen und Analysemodelle zur thermischen Quantifizierung einer Heizschicht auf bzw. innerhalb eines Basismaterials eingegangen werden. Ziel ist es hierbei, eine Abschätzung der erwarteten Temperaturverteilungen beim Betrieb entsprechender Heizschichten auf der Leiterplatte zu bekommen. Weiterhin soll somit die notwendige Leistungsdichte bestimmt werden, die zum Erreichen von Temperaturen bis maximal 250 °C auf der Oberfläche der Leiterplatte erforderlich ist. Bei der praktischen Anwendung können die so gewonnen Erkenntnisse und erstellten Modelle genutzt werden, um die Ergebnisse besser bewerten zu können.

Thermische Analyse
in dieser Arbeit

3.2.1 WÄRMEWIDERSTAND UND THERMISCHES ERSATZSCHALTBILD

Für die analytische Beschreibung von thermischen Problemstellungen nutzen Elektriker gerne die Analogie zwischen thermischen und elektrischen Größen aus. Ausführliche Beschreibungen dazu finden sich unter anderem in [172] und [108]. Einige wichtige Grundlagen sollen auch hier dargelegt werden. Analog dem ohmschen Gesetz der Elektronik gilt für die Beschreibung der Wärmeübertragung in seiner allgemeinsten Form

Analogie zwischen Thermodynamik und Elektrotechnik

$$R_{th} = \frac{dT}{\dot{Q}} \quad (\text{GL. 3-4})$$

mit dem thermischen Widerstand R_{th} , der Temperaturdifferenz dT und dem Wärmestrom \dot{Q} .

Bei dem Transport der Wärme zwischen zwei Punkten einer Leiterplatte treten verschiedene thermische Widerstände auf, die den Wärmestrom behindern und eine Temperaturdifferenz zur Folge haben. Je nach Mechanismus dieser Behinderung lässt sich zwischen Wärmeleitwiderstand $R_{th,\kappa}$, Wärmeübergangswiderstand $R_{th,\alpha}$ und thermischen Kontaktwiderstand $R_{th,K}$ unterscheiden. Unter Berücksichtigung von (Gl. 2-23) ergibt sich der Wärmeleitwiderstand durch ein homogenes Material mit Querschnittsfläche A und der Dicke d nach

Thermischer Widerstand

$$R_{th,\kappa} = \frac{d}{\kappa \cdot A} \quad (\text{GL. 3-5})$$

Der an einer Grenzfläche A zwischen Körper und Fluid auftretende konvektive Wärmeübergangswiderstand ergibt sich mit (Gl. 2-24) aus

$$R_{th,konv} = \frac{1}{\alpha_K \cdot A} \quad (\text{GL. 3-6})$$

mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K . Analog dazu ergibt sich der radiative Wärmeübergangswiderstand $R_{th,rad}$ mit dem Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung h_s aus (Gl. 2-27) als

$$R_{th,rad} = \frac{1}{h_s \cdot A} \quad (\text{GL. 3-7})$$

an einer Grenzfläche A .

Die bisher genannten Widerstandsarten treten innerhalb eines komplexen thermischen Systems auf, wenn an den Grenzschichten jeder Punkt einer Schicht in Verbindung (chemische Bindung oder Adhäsion) mit einem Punkt der benachbarten Schicht ist. [108] Da reale Oberflächen gewisse Rauigkeiten aufweisen, ist die thermische Kontaktfläche jedoch kleiner als die scheinbare geometrische Fläche. Dies lässt sich analog zu

Thermischer Kontaktwiderstand

den Betrachtungen des elektrischen Kontaktwiderstandes in Abschnitt 2.1.2.2 beschreiben. Auf den so entstehenden thermischen Kontaktwiderstand soll nur qualitativ verwiesen werden. Innerhalb des hier untersuchten Systems einer mehrschichtigen Leiterplatte wird von näherungsweise idealem Kontakt zwischen den Lagen ausgegangen. Durch das thermische Verpressen eines erweichten Harzes unter erhöhtem Druck sollten Lufteinschlüsse innerhalb der Grenzschicht vermieden werden. Untersuchungen in [169] bestätigen, dass die Verbindung zwischen Kupfer und Glasfaserlaminat hinreichend gut ist und so der Kontaktwiderstand vernachlässigt werden kann.

Mit Hilfe der beschriebenen Widerstände und der Analogie von thermischen und elektrischen Größen ist es nun möglich, thermische Vorgänge in Form eines thermischen Ersatzschaltbildes darzustellen. Diese können beispielsweise verwendet werden, um thermische Verläufe bei Verlustleistungen an Bauelementen [173] oder Kühlkörperberechnungen [174] abzubilden. Hierdurch lassen sich die analytischen Methoden der Netzwerkanalyse auf das thermische Modell anwenden. Am Beispiel einer Leiterplatte mit einer einseitig aufgetragenen, vollflächigen Heizschicht soll die thermische Modellbildung kurz dargestellt werden. (Abbildung 3-14)

Thermisches
Ersatzschaltbild

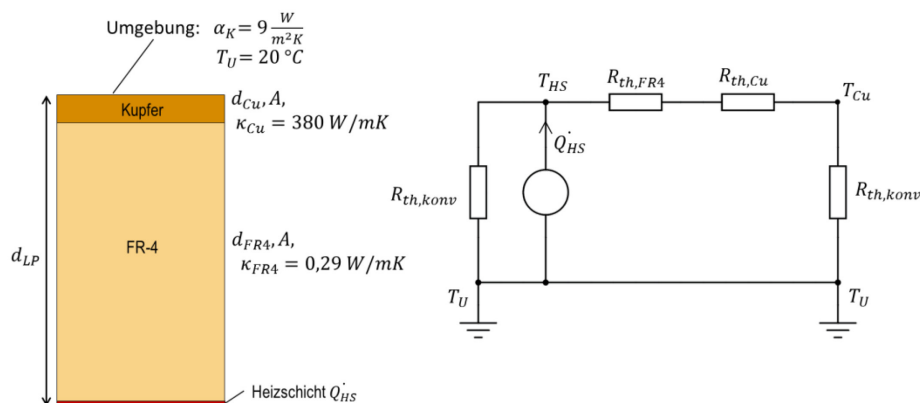


ABBILDUNG 3-14: BEISPIEL FÜR THERMISCHES ERSATZSCHALTBIKD EINES LEITERPLATTEN-BASISMATERIALS MIT VOLLFLÄCHIGER HEIZSCHICHT AUF RÜCKSEITE

Die an der Unterseite liegende Heizschicht wird in dem Modell als ideale Wärmequelle angenommen. Die thermischen Widerstände zur Oberseite werden durch eine Schicht aus FR-4-Laminat ($d = 0,25 \text{ mm}; 1,5 \text{ mm}; 3 \text{ mm}$), eine darauf liegend Kupfereauflage ($35 \text{ }\mu\text{m}$) sowie einen konvektiven Wärmewiderstand zur Umgebung gebildet. Verluste durch Strahlung werden hier zunächst noch vernachlässigt. Die konvektiven Verluste an der offenen Heizschicht werden durch die Parallelschaltung eines identischen Konvektionswiderstandes abgebildet. Mit den Regeln der Netzanalyse sowie (Gl. 3-5) und (Gl. 3-6) ergibt sich der Gesamtwiderstand des Systems nach

Einfaches ESB –
statisch

$$\begin{aligned}
 R_{th,ges} &= (R_{th,FR4} + R_{th,Cu} + R_{th,konv}) || R_{th,konv} \\
 &= \frac{[(R_{th,FR4} + R_{th,Cu} + R_{th,konv}) \cdot R_{th,konv}]}{R_{th,FR4} + R_{th,Cu} + 2 \cdot R_{th,konv}} \\
 &= \frac{[(\frac{d_{FR4}}{\kappa_{FR4} \cdot A} + \frac{d_{Cu}}{\kappa_{Cu} \cdot A} + \frac{1}{\alpha_K \cdot A}) \cdot \frac{1}{\alpha_K \cdot A}]}{\frac{d_{FR4}}{\kappa_{FR4} \cdot A} + \frac{d_{Cu}}{\kappa_{Cu} \cdot A} + \frac{2}{\alpha_K \cdot A}}
 \end{aligned}
 \tag{GL. 3-8}$$

. Mit (Gl. 3-4) und den entsprechenden Materialdaten lassen sich nun alle Parameter des Systems berechnen. Abbildung 3-15 zeigt die statischen Temperaturen an der Heizschicht und auf der Kupferoberseite in Abhängigkeit der Verlustleistung sowie der Laminatdicke für eine Materialfläche von 100 cm^2 . Die Temperatur der Heizschicht wird dabei zwischen 30 °C und 290 °C variiert. Das entspricht Leistungsdichten zwischen $0,017 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ und $0,48 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$.

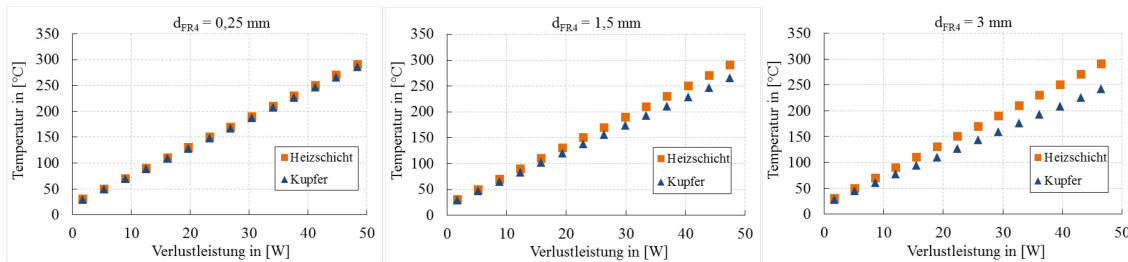


ABBILDUNG 3-15: STATISCHES TEMPERATURVERHALTEN AN HEIZSCHICHT (UNTERSEITE) UND KUPFERFLÄCHE (OBERSEITE) VON FR-4-LAMINATEN VERSCHIEDENER DICKEN

In Abbildung 3-15 sind die Temperatur der Heizschicht sowie die sich ergebenden Temperaturen auf der gegenüberliegenden Kupferseite in Abhängigkeit von der Verlustleistung für drei verschiedene Dicken dargestellt. Es ist nicht überraschend, dass die Temperaturunterschiede mit steigender Leistung zunehmen und dass bei einer dickeren Leiterplatte größere Differenzen auf Grund des größeren thermischen Widerstandes auftreten. Die Rechnung hat zudem keinen nennenswerten Unterschied zwischen dem Berücksichtigen oder Vernachlässigen der Kupferschicht gezeigt. Dies liegt unter anderem auch daran, dass hier zunächst keine Strahlungsverluste berücksichtigt werden. Einen deutlichen Einfluss hingegen hat die Wahl der Material- und Umgebungsparameter von α und κ . Dies lässt sich an einer exemplarischen Variation des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten verdeutlichen.

Ergebnisse des statischen ESB

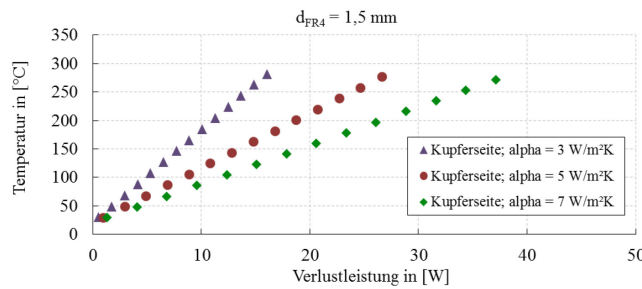


ABBILDUNG 3-16: TEMPERATUREN AUF DER KUPFERSEITE DES STATISCHEN LEITERPLATTENMODELLS BEI DER VARIATION DES KONVEKTIVEN WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN

Abbildung 3-16 zeigt den Einfluss der Variation des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten zwischen $3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ bis $7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ für das zuvor beschriebene Modell einer 1,5 mm dicken Leiterplatte. Infolge der ungenauen Kenntnis der Material- und Umgebungsparameter wird in der Darstellung nochmals deutlich, mit welchen Unsicherheiten derartige Berechnungsmodelle behaftet sind.

Da sich die Aussagekraft einer statischen Rechnung im thermischen Gleichgewicht eher auf die Bestimmung grundlegender Abhängigkeiten beschränkt, soll das Modell um die Miteinbeziehung des zeitlichen Faktors erweitert werden. Diese dynamische Modellierung wird im thermischen Ersatzschaltbild durch die Einführung von kapazitiven Komponenten entsprechend dem Foster [172] oder Cauer- [172] Modell erreicht. Hierbei wird im Modell jedem zu durchwärmenden Festkörper eine Wärmekapazität C_{th} zugeordnet, die sich mit der jeweiligen spezifischen Wärmekapazität und Dichte nach

$$C_{th} = c \cdot \rho_D \cdot d \cdot A \quad (\text{GL. 3-9})$$

berechnen lässt. Da hier das als physikalisch richtig geltende Cauer-Modell [172] genutzt wurde, werden die Kapazitäten zwischen den Knotenpunkten und dem Bezugspotential (Umgebungstemperatur) angeordnet. Diese bilden mit den jeweiligen Widerständen RC-Glieder, welche über eine thermische Zeitkonstante miteinander verknüpft sind. Da die mathematische Berechnung nach dem Cauer-Modell vergleichsweise aufwendig ist, wurde hierfür eine computergestützte Modellrechnung verwendet. Das modellierte thermische Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3-17 dargestellt und wurde neben den Kapazitäten auch um die Strahlungsverluste an Ober- und Unterseite der Leiterplatte erweitert. Zudem wird die Heizschicht in diesem Modell als eingebettet betrachtet. Dadurch kann von einem ‚gespiegelten‘ Aufbau des Netzwerkes nach oben sowie nach unten ausgegangen werden. Eine Unterscheidung wird bei der Verwendung der freien konvektiven Verluste gemacht, indem von einer horizontal liegenden Platte ausgegangen wird, deren nach unten gerichteter Wärmeübergangskoeffizient nur etwa halb so groß ist wie bei der aufwärts gerichteten Konvektion. [130]

Erweitertes ESB –
dynamisch

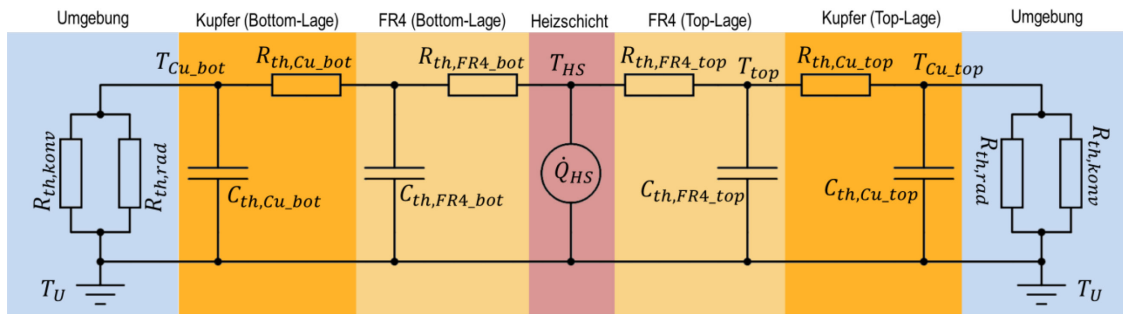


ABBILDUNG 3-17: THERMISCHES ERSATZSCHALTBIOD FÜR EINE ENDOGEN ERWÄRMTE LEITERPLATTE NACH DEM CAUER-MODELL

Die für das dynamische Modell verwendeten Parameter werden in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Für das FR-4-Material wird dabei vereinfacht eine isotrope Wärmeleitfähigkeit angenommen. Die Heizschicht wird zunächst nur als 2-dimensionale Fläche mit entsprechender Verlustleistung angenommen. Außerdem werden Verluste über die schmalen Randflächen vernachlässigt.

TABELLE 3-2: PARAMETER FÜR DAS THERMISCHE MODELL EINER VEREINFACHTEN LEITERPLATTE MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT

	Parameter	Werte
Leiterplatte	A	$100 \cdot 100 \text{ mm}^2$
Heizschicht (2-dimensionale Schicht)	\dot{Q}_{HS}	$10 - 60 \text{ W}$
FR-4	$d_{FR4} = d_{FR4_top} + d_{FR4_bot}$	$1,75 \text{ mm}$
	κ_{FR4}	$0,29 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
	c_{FR4}	$1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
	ρ_{D_FR4}	$2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	ε_{FR4}	$0,93$
Kupfer	d_{Cu}	$35 \mu\text{m}; \text{ variiert}$
	κ_{Cu}	$380 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
	c_{Cu}	$385 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
	$\rho_{D_{Cu}}$	$8960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	ε_{Cu}	$0,1$
Freie Konvektion	α_{K_top}	$13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
	α_{K_bot}	$6,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

Mit diesem Modell lässt sich das Aufheizverhalten des gesamten Systems bestimmen. In Abbildung 3-18 sind die Temperaturverläufe an der Oberseite der betrachteten Lei-

Ergebnisse des
dynamischen ESB

terplatte beim Betrieb der Heizschicht in 1,5 mm Tiefe des FR-4-Materials für verschiedene Leistungsdichten ($0,1 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ bis $0,6 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$) über einen Zeitraum von 6 min dargestellt. Diese Zeitspanne wurde deshalb gewählt, da dieser Bereich ähnlich den vorgeschriebenen Prozesszeiten für Lötprozesse ist. Darüber hinaus beginnt sich das System in diesem Zeitraum dem thermischen Gleichgewicht zu nähern, so dass bei längerem Betrieb nur noch geringe Temperaturänderungen auftreten.

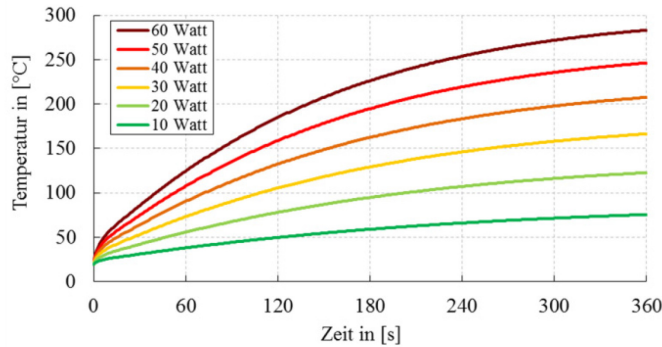


ABBILDUNG 3-18: TEMPERATURENTWICKLUNG AN DER OBERSEITE DES MODELLIERTEN LEITERPLATTENAUFBAUS BEI UNTERSCHIEDLICHEN VERLUSTLEISTUNGEN IN DER HEIZSCHICHT

Die Heizschicht, als Bereich der Energieumwandlung, wird stets die höchsten Temperaturen in diesem Modell aufweisen. Die Temperaturen an den Außenseiten in Abhängigkeit von der Einbetttiefe der Heizschicht werden in Abbildung 3-19 exemplarisch für einen Betrieb von 60 s bzw. 360 s mit $0,6 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ dargestellt. Erwartungsgemäß ist der Temperaturunterschied von einer Außenlage zur Heizschicht umso geringer, je dichter diese an der Oberfläche ist. Demzufolge erreicht der Temperaturgradient in der z-Achse (ΔT_{\perp}) bei mittiger Einbettung ein Minimum. Bei fortlaufendem Betrieb verschiebt sich dieses Minimum etwas in Richtung der Oberseite, begründet durch die Wahl der unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten. Für dünnere Leitplatten würden sich diese Unterschiede zwischen den Schichten weiter reduzieren und die absoluten Temperaturen sich dafür erhöhen.

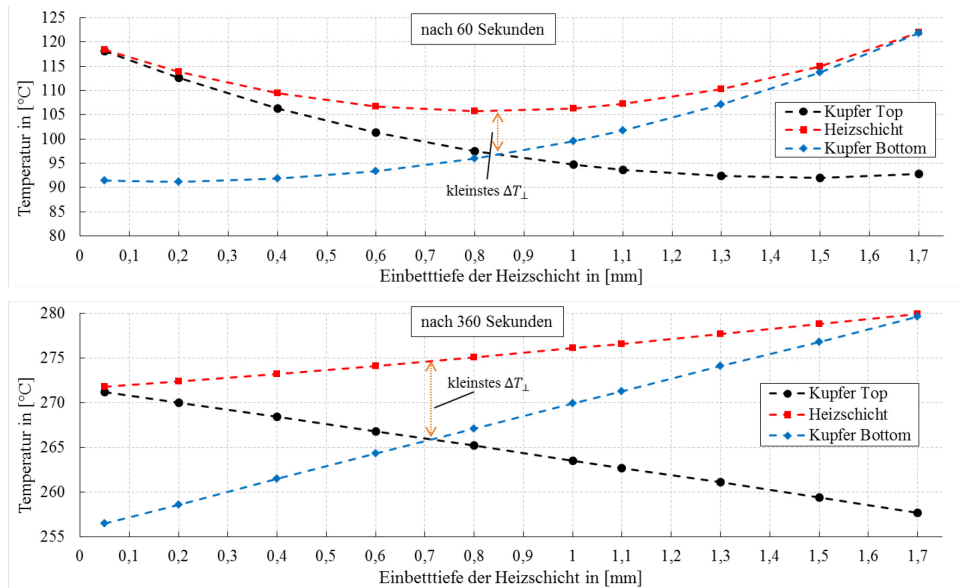


ABBILDUNG 3-19: TEMPERATURUNTERSCHIEDE AN OBER- UND UNTERSEITE EINER LEITERPLATTE IN ABHÄNGIGKEIT DER EINBETTIEFE DER HEIZSCHICHT (NACH 360 S; 60 W; 100 CM²)

Durch die Berücksichtigung der Wärmekapazitäten lässt sich an diesem Modell nun auch der Einfluss unterschiedlich starker Kupferschichten auf den Außenlagen darstellen. Im linken Teil von Abbildung 3-20 ist das Aufheizverhalten bei 60 W neben den 35 μm dicken Kupferlagen auch für 200 μm bzw. 400 μm dickes Kupfer dargestellt. Die Aufheizkurve verzögert sich entsprechend der größeren thermischen Massen. Als Vergleich ist außerdem die Aufheizkurve für eine Platine ohne Kupfer auf den Außenlagen dargestellt. Hier wird zwar deutlich schneller ein thermisches Gleichgewicht erreicht, doch liegt die maximale Temperatur deutlich unterhalb der, von den verkupferten Varianten. Dies ist auf den viel höheren Emissionskoeffizienten des FR-4 zurückzuführen, wodurch die Strahlungsverluste an den Flächen deutlich höher sind als bei der als blank angenommenen Kupferoberfläche.

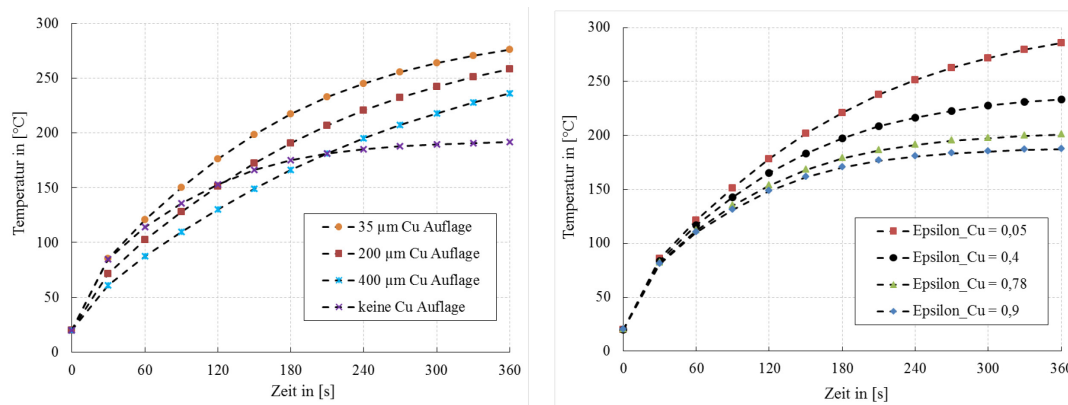


ABBILDUNG 3-20: AUFHEIZKURVEN AUF DER OBERSEITE BEIM BETRIEB MIT EINGEBETTETER HEIZSCHICHT FÜR VERSCHIEDENE KUPFERLAGENSTÄRKEN (LINKS) UND UNTERSCHIEDLICHE EMISSIONSKOEFFIZIENTEN DES KUPFERS (RECHTS)

Zum besseren Vergleich wurde die Rechnung für 35 µm starkes Kupfer mit einer Variation der Emissionskoeffizienten wiederholt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-20 rechts dargestellt. Diese Betrachtung ist sinnvoll, da stark oxidierte Kupferoberflächen sehr viel stärker emittieren als blanke und solche Oxidationsprozesse bereits im Betrieb bei den hier dargestellten Temperatur- und Zeitbereichen an Kupferschichten (ungeschützt) zu erwarten sind. Reale Leiterplatten haben auf den Außenlagen eine durchschnittliche Flächenbeladung mit Kupfer von ca. 20 % bis hin zu 80 % bei der Verwendung von Masseflächen. Für den Betrieb mit integrierter Heizschicht wäre demnach ein hoher Anteil von dünnem Kupfer (mit niedrigem ε) auf den Außenlagen aus energetischer Sicht von Vorteil. Hierdurch sollte auch die laterale Wärmeverteilung verbessert werden, welche in diesem Modell noch nicht berücksichtigt ist.

Deshalb soll in einem weiteren Iterationsschritt die Modellbildung mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) beschrieben werden. Das zuvor beschriebene Modell wird als physikalisches Modell in einer Simulationssoftware (COMSOL Multiphysics®) umgesetzt. Da die numerische Berechnung sehr stark von den eingegebenen Materialparametern und Grenzbedingungen abhängt, sei an dieser Stelle auf einige Festlegungen hingewiesen. Es wurde bereits aufgeführt, welchen Einfluss die Wahl der thermischen Randbedingungen auf das Verhalten des untersuchten Systems hat. Die konvektiven Randbedingungen hängen z.B. von der Größenordnung des jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten ab. Dessen nähere Bestimmung kann durch aufwendige Rechenverfahren, wie sie in [124], [125] oder [130] beschrieben sind, durchgeführt werden. Auf deren Darstellung soll in dieser Arbeit verzichtet werden. Für die Simulation des zuvor beschriebenen Modells (100 mm x 100 mm x 1,75 mm) wurden folgende Wärmeübergangskoeffizienten zu Luft festgelegt ($\alpha_{K_top} = 13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$; $\alpha_{K_bot} = 6,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$; $\alpha_{K_vertikal} = 36,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$). Das aufgebaute 3D-Modell, wie es in Tabelle 3-2 beschrieben wurde, ist in Abbildung 3-21 als vernetztes Objekt und mit einer simulierten Temperaturverteilung für einen Betrieb über 6 min bei $0,6 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ dargestellt.

FEM Modellierung

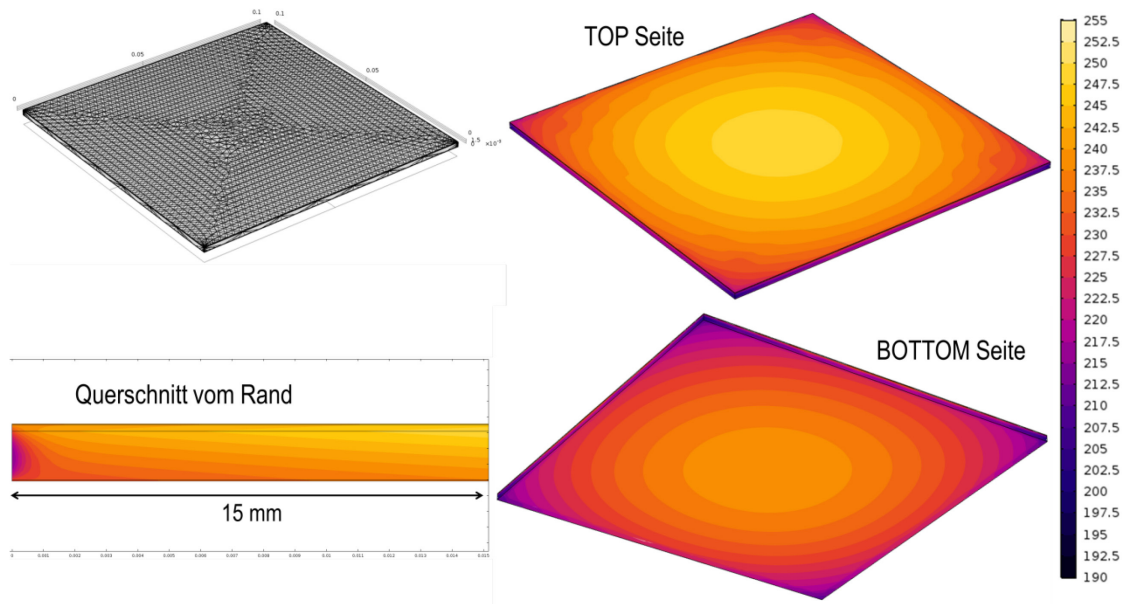


ABBILDUNG 3-21: FEM-MODELL EINER ENDOGEN ERWÄRMTE LEITERPLATTE; RECHENNETZ (OBEN LINKS); TEMPERATURVERTEILUNGEN TOP- UND BOTTOM-SEITE (OBEN RECHTS; UNTEN RECHTS); TEMPERATURVERTEILUNG IM INNEREN AUSSCHNITT VOM QUERSCHNITT DES RANDES IM ABSTAND VON 50 MM VON DER ECKE

Die Heizschicht wurde hierfür ebenfalls als 2-dimensionale Fläche mit entsprechender Verlustleistung definiert. Eine vergleichende Simulation mit einer 3D-Heizschicht von 50 μm Dicke und den Materialparametern für Graphit hat gegenüber der 2D-Variante nur minimale Unterschiede innerhalb der thermischen Ergebnisse produziert, benötigt jedoch längere Rechenzeiten auf Grund der zusätzliche Verfeinerung des Rechenetzes entlang der Heizschicht.

Heizschicht im Modell

Der zuvor bereits diskutierte Einfluss von Kupfer oder reinem FR-4 auf den Außenlagen soll an diesem 3D-Modell noch einmal verifiziert und zudem die resultierende Temperaturverteilung dargestellt werden. In Abbildung 3-22 ist der direkte Vergleich (vereinheitlichte Temperaturskala) zwischen der Erwärmung beider Platinenversionen bei 60 W Verlustleistung in einer 0,2 mm tief liegenden Heizschicht nach 6 min dargestellt.

Vergleich Kupfer und FR-4 Oberfläche

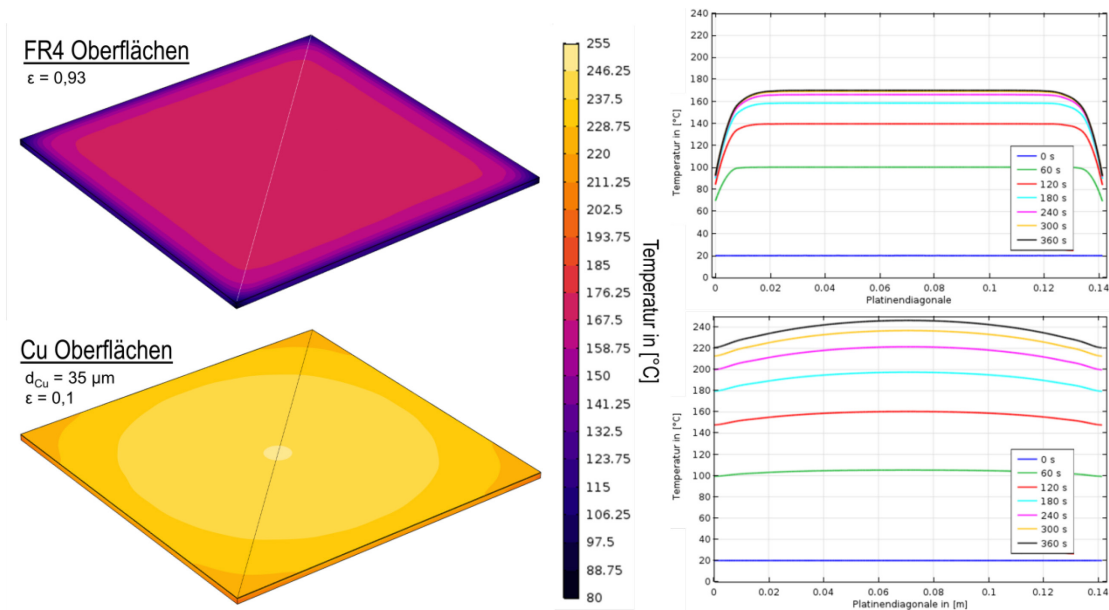


ABBILDUNG 3-22: TEMPERATURVERTEILUNG BEI ERWÄRMUNG (60 W; 360 s) MIT FR-4 (OBEN) UND KUPFER (UNTEN) AUF DEN AUßENLAGEN (UNTEN)

Es fällt auf, dass bei einer reinen FR-4-Oberfläche die maximal erreichte Temperatur mit ca. $170^{\circ}C$ nur etwa $2/3$ der Maximaltemperatur von ca. $240^{\circ}C$ auf der Kupferauflage ist. Die Darstellung des Temperaturgradienten über die Platinendiagonale der Oberseite in Abbildung 3-22 zeigt außerdem die Temperaturabfälle in den Randbereichen. Da hier von Ecke zu Ecke gemessen wird, sind diese besonders ausgeprägt. Durch die viel höhere Wärmeleitfähigkeit des Kupfers wird die Wärme schnell zu den Randbereichen transportiert, wodurch dieser Gradient nicht so stark ausfällt wie bei der Platine ohne Kupfer, bei welcher die Verlustmechanismen den dominierenden Einfluss zeigen. Dem gegenüber steht eine deutlich homogenere Temperaturverteilung über ca. 80 % der inneren Flächen der Platine auf der FR-4-Oberfläche. Diese beiden Varianten stellen Grenzfälle dar, welche so in der Realität nicht vorkommen werden. Eine effektive Temperaturverteilung einer realen Platine mit einer Mischung aus FR-4 und Kupfer wird thermisch dazwischen liegen, so dass kleine Temperaturgradienten über die Gesamtfläche als auch größere Gradienten am Rand der Platine berücksichtigt werden müssen.

Die anteilig größeren Verluste zum Rand hin müssen besonders für die späteren Anwendungen berücksichtigt werden. Bisher wurde in den Modellen von einer Heizschicht ausgegangen, deren Heizfläche 1:1 der modellierten Platinengröße entspricht. In Abbildung 3-23 sind die simulierten Temperaturverteilungen entlang der mittigen Querschnittsebene des Modells in Abhängigkeit der leistungsumsetzenden Fläche und des Außenlagen Materials (FR-4 und Kupfer) nach 360 s bei $0,6 \frac{W}{cm^2}$ dargestellt.

Abstand der Heizschicht vom Rand

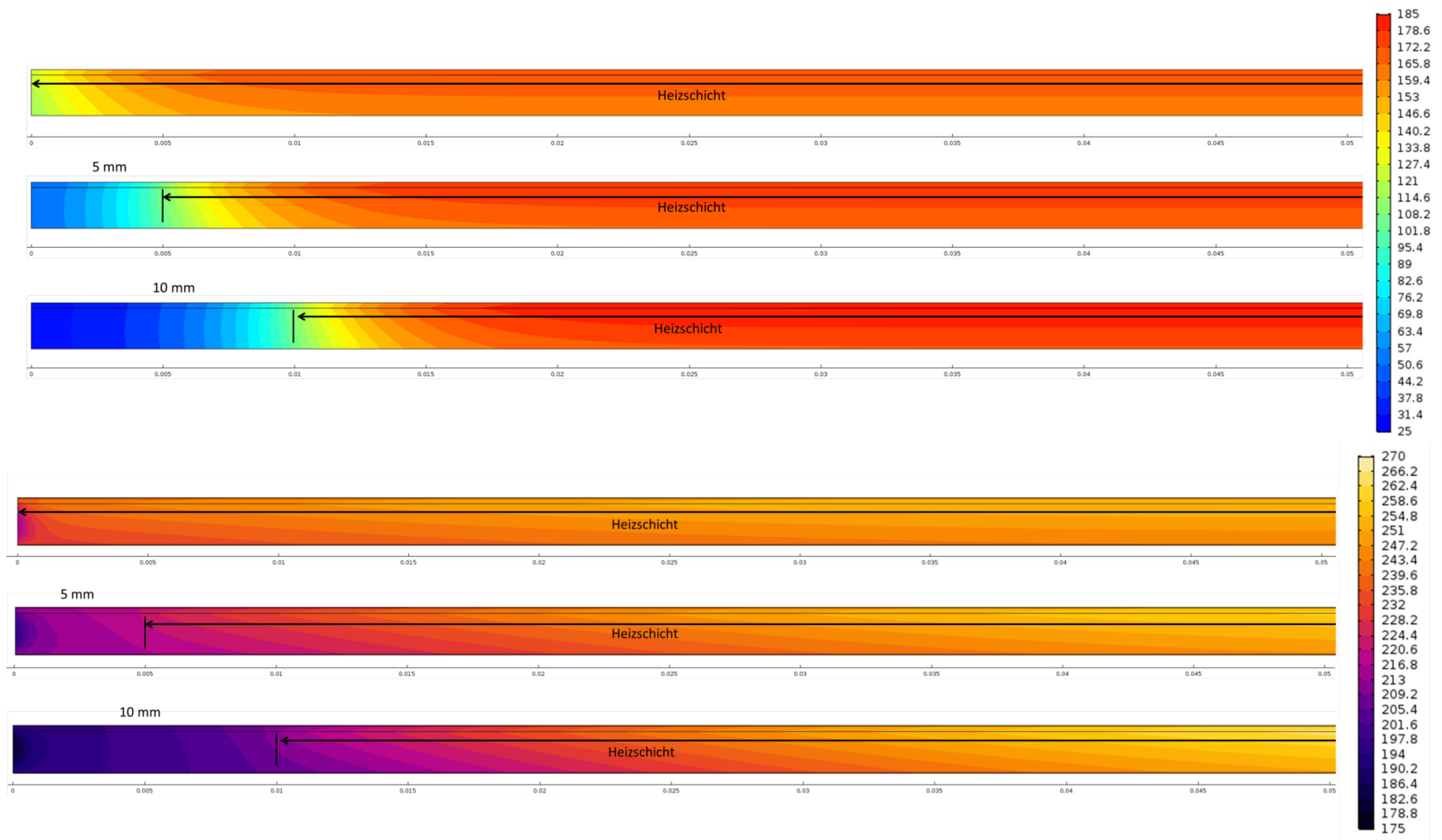


ABBILDUNG 3-23: SIMULIERTE TEMPERATURVERTEILUNG AN DER MITTLEREN QUERSCHNITTSEBENE DES MODELLS FÜR VERSCHIEDENE HEIZSCHICHTABSTÄNDE ZUM RAND (0 mm; 5 mm; 10 mm) FÜR PLATINEN MIT REINEN FR-4-AUßENLAGEN (OBEN) UND BEIDSEITIGER KUPFERAUFLAGE (UNTEN)

Die Kühlung durch die Randverluste wirkt sich umso stärker auf die Temperaturverteilung aus, je größer der Abstand der Heizschicht von der Kante ist. Deutlicher werden die resultierenden Temperaturgradienten in der Abbildung 3-24. Dass mit zunehmenden Abstand höhere Maximaltemperaturen erreicht werden, ist auf die größeren Leistungsdichten bei kleiner werdender Fläche zurückzuführen.

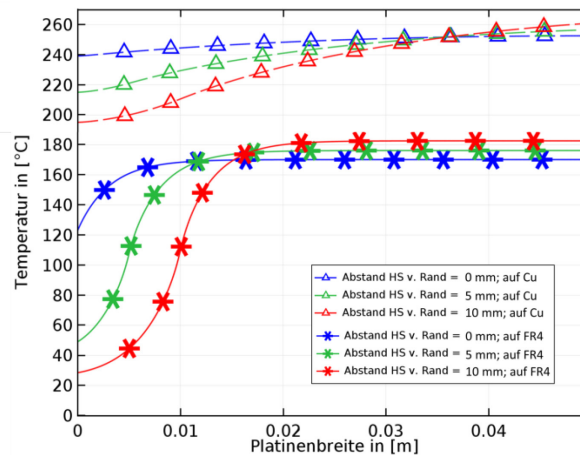


ABBILDUNG 3-24: DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNGEN ENTLANG DER OBERFLÄCHE DER HALBEN MITTELACHSE DES MODELLS FÜR VERSCHIEDENE ABSTÄNDE DER HEIZSCHICHT AUF FR-4 UND KUPFER

Bei der technologischen Applikation einer Heizschicht werden Abstände > 0 zum Rand als wahrscheinlich angesehen und müssen daher beim Design des Layouts berücksichtigt werden, um eine effektive Erwärmung z.B. von Lötstellen zu erreichen.

3.2.2 ENERGIEBEDARF ZUM ERWÄRMEN VON LEITERPLATTE UND FÜGESTELLEN

Der Energiebedarf zum Erwärmen einer endogen beheizten Leiterplatte ergibt sich aus der aufgebrachten Leistung und der Zeit, über die diese wirkt. Aus dem in Abschnitt 3.2.1 diskutierten FEM-Modell lassen sich erste Werte abschätzen. Um die beschriebene horizontale Modellplatine mit einer 100 mm x 100 mm großen Heizschicht innerhalb von 5 min auf ca. 250 °C aufzuheizen (min. 90 % der Oberfläche auf 250 °C), sind für eine reine FR-4-Oberfläche mindestens 110 W ($\hat{=}$ 33 kJ) und für eine reine Kupfer Oberfläche mindestens 70 W ($\hat{=}$ 21 kJ) erforderlich. Die entsprechenden Leistungsdichten betragen also $1,1 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ bzw. $0,7 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$. Mit höheren Leistungen wären natürlich kürzere Aufheizzeiten und umgekehrt möglich.

Energieabschätzung
aus vorherigen
Modellen

Um die notwendigen Leistungsdichten auf einer unterschiedlich mit Bauelementen bestückten Leiterplatte besser einschätzen zu können, wurde ein einfaches 2D-FEM-Modell erstellt. Bei diesem wurde eine 160 mm breite Leiterplatte (1,75 mm dick) um

Erweitertes FEM
Modell

drei unterschiedliche elektronische Komponenten (2512-Chip-Widerstand, BGA324 und QFN64) und einen zufällig verteilten Kupferanteil auf der Oberseite von ca. 20 % erweitert. Die Heizschicht wurde zunächst als durchgehende Schicht in einer Tiefe von 0,2 mm der Leiterplatte definiert. Zwischen den in Abbildung 3-25 dargestellten modellierten Bauteilen und den Kupferpads wurden 120 µm hohe Lotpastendepots eingefügt. Der BGA verfügt zusätzlich über Lotkugeln, die in den Pastendepots liegen.

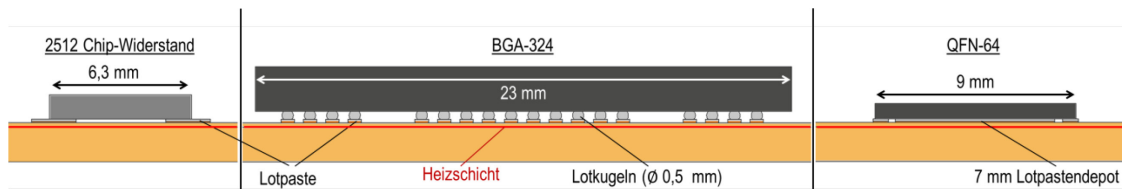


ABBILDUNG 3-25: MODELLIERTE BAUTEILE FÜR NUMERISCHE BESTIMMUNG DER NOTWENDIGEN LEISTUNGSDICHTE ZUM HEIZEN BIS AUF CA. 217 °C

Die Baugruppe wurde von einer als Luft definierten Box umgeben, in der eine geringe Strömungsgeschwindigkeit die thermischen Verluste durch freie Konvektion simuliert. Weiterhin wurden Strahlungsverluste entsprechend der Materialoberflächen berücksichtigt.

Anhand dieses einfachen abstrahierten Modells soll nun eine Verlustleistung in der Heizschicht definiert werden, die eine endogene Erwärmung der Leiterplatte und damit auch eine Erwärmung der Lotdepots durchführt. Als Zielwert soll eine Erwärmung aller Lotbereiche auf über 217 °C (Liquidustemperatur von SAC305-Lot) dienen. Messpunkte in den Pastendepots des 2512 und QFN bzw. in den äußeren und inneren Lotkugeln des BGA sollen die Temperaturen erfassen. Ab einer Leistungsdichte von $1 \frac{W}{cm^2}$ in der Heizschicht konnten in der Simulation alle Lotstellen die Zieltemperatur innerhalb von 6 Minuten erreichen. Abbildung 3-26 zeigt die Temperaturverläufe in den Messpunkten sowie die finale Temperaturverteilung in den Bereichen der Bauteile.

Verlustleistung zum Löten

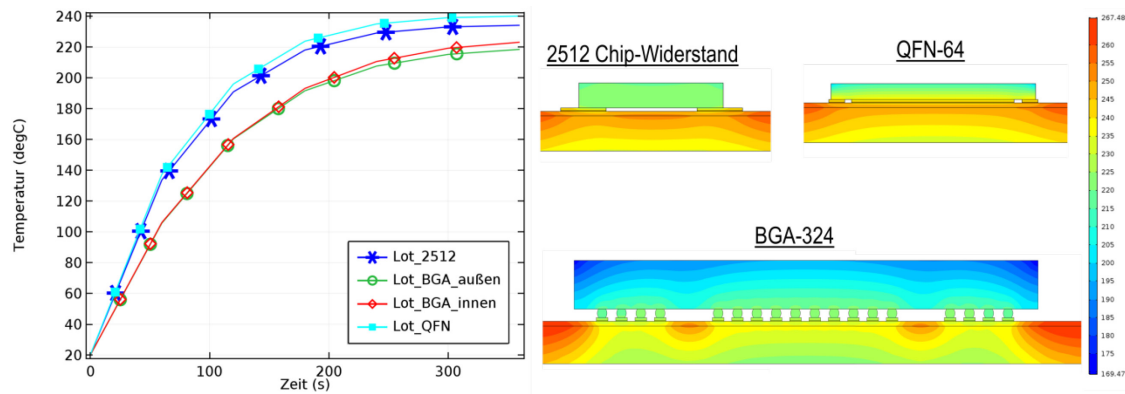


ABBILDUNG 3-26: SIMULIERTE TEMPERATURANSTIEGE IN DEN LOTDEPOTS VERSCHIEDENER BAUFORMEN (LINKS) UND DIE TEMPERATURVERTEILUNG IN DEN BAUTEILEN NACH 360 s BEI ENDOGENER ERWÄRMUNG MIT 1 W/cm^2 (RECHTS)

Die errechneten Werte sollten im Einzelnen nicht als maßgebend angesehen werden, die generelle Verteilung der Temperaturen, bei welcher die Bauteilpackages kühler bleiben als die Leiterplatte, erscheinen aber plausibel. Demnach benötigen die Lotkugeln des BGA (größere thermische Masse) länger als die anderen Komponenten, um die Zieltemperatur zu erreichen. Entgegen dieser Variante des vollflächigen Heizens mit einer durchgehenden Schicht wurde auch eine Reihe von Versuchen mit lokal definierten Heizstrukturen unterhalb der Bauelemente durchgeführt. Erwartungsgemäß waren hierbei höhere Leistungsdichten bis zu $1,7 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ am kleinsten Segment notwendig, um den Zielwert zu erreichen. Als Ergebnis dieser Vorbetrachtungen soll daher zunächst eine Heizleistung von maximal $2 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ definiert werden, welche eine einzelne Heizschicht in der Lage sein muss umzusetzen.

In dem numerischen Beispiel aus Abbildung 3-26 sind ca. 24 kJ an Energie aufgebracht worden. Der Großteil der Energie ist hierbei notwendig, um die Baugruppe zu durchwärmen. Rechnerisch würden die einzelnen Lotmaterialdepots nur einen Bruchteil dieser Energie benötigen, um selektiv auf Schmelztemperatur erwärmt zu werden, die Schmelzenthalpie des Phasenwechsels aufzubringen, sowie Zeit für Diffusionsprozesse zu ermöglichen. In [175] wird diese Diskrepanz anhand von praktischen Messdaten an unterschiedlichen Lötstellen, denen selektiv Energie zugeführt wird, aufgezeigt. Die damit zusammenhängende energetische Ineffizienz herkömmlicher Reflowlötprozesse wird umso deutlicher, wenn man die Leistungsdaten einer industriellen Zwangskonvektionslötmaschine betrachtet. In Abbildung 3-27 ist nach Herstellerdaten [176] die Verbrauchsmessung einer solchen Anlage dargestellt.

Energetische Einordnung der endogenen Erwärmung

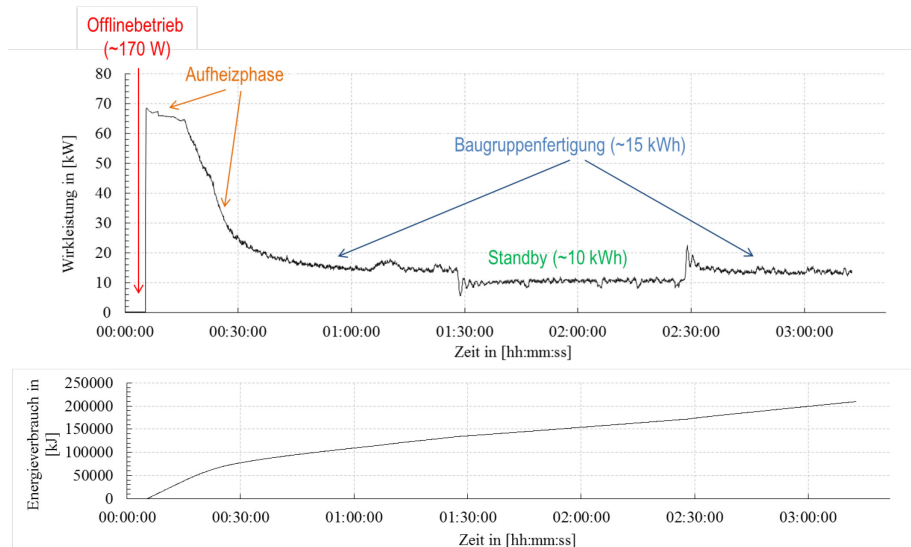


ABBILDUNG 3-27: LEISTUNGSVERBRAUCH EINER INDUSTRIELLEN ZWANGSKONVEKTIONSLÖTMASCHINE WÄHREND VERSCHIEDENER BETRIEBSPHASEN (OBEN); ENERGIEVERBRAUCH ÜBER DIE MESSDAUER (UNTEN) (NACH DATEN AUS [176])

Die Messdaten zeigen zunächst den Offlinebetrieb während dessen die Anlage nicht genutzt wird und dementsprechend nur relativ wenig Energie (0,17 kWh) verbraucht. Bei Betriebsbeginn werden in der Aufheizphase zunächst u.a. die Heizzonen auf Arbeitstemperatur gebracht, was einen hohen Energieaufwand bedeutet. Im Leerlaufbetrieb verbraucht diese Anlage immerhin noch 10 kWh. Wohingegen im laufenden Fertigungsbetrieb dann durchschnittlich 15 kWh verbraucht werden, da hier ein Fluten mit Stickstoff eine zusätzliche Kühlung in den Prozess einträgt. Geht man nun von einer Fertigungsleistung der Anlage bei mittlerer Auslastung von 240 Baugruppen pro Stunde aus, dann müssen pro Stück $\text{ca. } 62,5 \text{ Wh} = 225 \text{ kJ}$ an Energie aufgebracht werden. Im Vergleich zur vorherigen numerischen Betrachtung entspricht dies etwa dem 10fachen Energieverbrauch gegenüber der endogenen Erwärmung. Diese Einschätzung verdeutlicht, zumindest qualitativ, das energetische Einsparpotential durch die Verwendung integrierter Heizschichten.

3.3 POTENTIAL BEI DER VERWENDUNG VON ENDOGENER ERWÄRMUNG

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Erarbeitung und Charakterisierung eines technologischen Prozesses zur Herstellung bzw. Integration eines Heizsystems in die Leiterplatte. In diesem Abschnitt soll ein solches Heizsystem hinsichtlich dessen technologischen Potentials für verschiedene Anwendungen in der Leiterplattentechnik diskutiert werden. Hierzu zählen Einsparpotentiale bei Ressourcen während Fertigungsprozessschritten und im aktiven Betrieb sowie weitere denkbare Anwendungsfelder für diese Technologie. Es sei darauf hingewiesen,

Allgemeines

dass hier auch theoretisch denkbare Prozesse vorgeschlagen werden sollen, deren Umsetzungen im Rahmen dieser Arbeit nicht praktisch untersucht wurden.

In Kapitel 3.1 wurde bereits der Einsatz von elektrischen DC-Heizmethoden als zielführendes Verfahren für die Systemumsetzung prognostiziert. Hieraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass ein solches Heizsystem verwendet werden könnte, sobald die energiewandelnde(n) Struktur(en) vorhanden, sowie Möglichkeiten der elektrischen Energieversorgung gegeben sind. Theoretisch ließe sich ein entsprechendes Heizsystem bereits beim Verpressen von Basismaterial einsetzen, sofern das zu heizende Material als Folie vorliegt und entweder über einen hinreichend großen spezifischen Widerstand verfügt oder es mit ausreichend Strom versorgt werden kann. Da aber für das Verpressen von Laminaten neben Temperatur auch mechanischer Druck und in den meisten Fällen auch Vakuum benötigt werden, wird für diese Anwendung nur wenig Einsparpotential bei der Anlagentechnik durch endogenes Heizen gesehen. Gelingt es, beim Verpressen oder in einem Folgeprozess die heizenden Strukturen zu integrieren, besteht ab hier die Möglichkeit, die Temper- und Trocknungsprozesse an den Laminaten durchzuführen, um mechanische Spannungen oder Feuchtigkeit in den Basismaterialien zu minimieren. Weiteres Nutzungspotential eines heizbaren Laminates besteht in der thermischen Unterstützung des Aufbringens und Trocknens polymerbasierter Ätzresiste.

Einsatzpotential für
die Leiterplattenferti-
gung

Unabhängig davon, welche Art von Heizsystem Verwendung findet, liegt spätestens mit dem Beginn der Baugruppenfertigung eine entsprechende endogen beheizbare Struktur in der fertigen Leiterplatte vor. Das größte Potential wird hierbei in der Abbildung von Reflowlötprozessen auf den bestückten Leiterplatten gesehen. Entgegen dem herkömmlichen Zwangskonvektionslöten würde die Wärmeerzeugung und Wärmeübertragung an die Lotmaterialdepots direkt in der Leiterplatte umgesetzt werden. Für den Serieneinsatz eines solchen Verfahrens wird jedoch ein neues Anlagenkonzept notwendig, das die elektrische Ankontaktierung der Heizschichten im Prozess gewährleistet. Denkbar wären verkürzte Durchlauföfen mit kontinuierlicher, regelbarer Energieversorgung über das Fördersystem und/oder geeignete Warenträger mit Federkontakten. In [177] wird dazu beispielsweise das Konzept eines Vertikalofens vorgestellt, in dem die elektrische Versorgung der Leiterplatten über entsprechende Kontaktstifte erfolgen kann.

Einsatzpotential für
die Baugruppenferti-
gung - Lötprozess

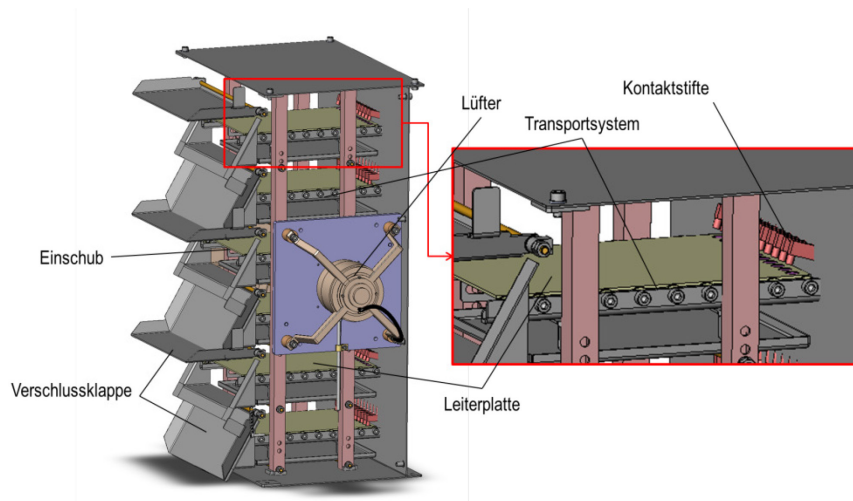


ABBILDUNG 3-28: KONZEPTSKIZZE EINES VERTIKALOFENS FÜR DAS REFLOWLÖTEN AN ELEKTRISCH BEHEIZTEN LEITERPLATTEN (NACH [177])

Durch die Veränderung der Prozesswärmeerzeugung ergeben sich verschiedene Einsparpotentiale für das endogene Löten. Unter der Annahme, dass ein herkömmlicher Lötprozess in einem Zwangskonvektionsofen vollständig durch einen Lötprozess mit endogen beheizten Leiterplatten substituiert werden kann, wurde durch einen Reflowlötanlagen-Hersteller in [178] eine Abschätzung zum erwarteten Einsparpotential verschiedener Ressourcen durchgeführt. Abbildung 3-29 zeigt die Reduzierung von Prozessressourcen wie Stickstoff, Leistung, Aufstellfläche und Abluft unter der Annahme, dass ein endogener Lötprozess den gleichen Durchsatz und die gleichen Prozesszeiten erlaubt wie ein Standardprozess.

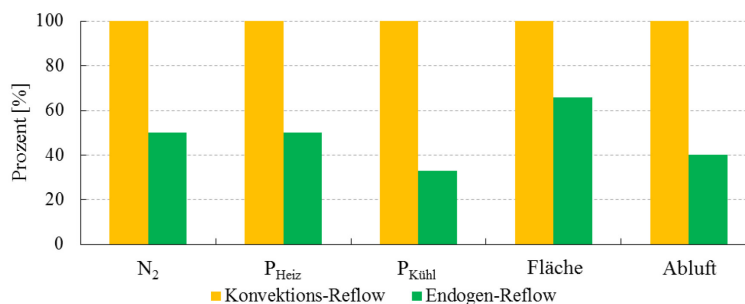


ABBILDUNG 3-29: EINSARPOTENTIALE BEI DER SUBSTITUTION EINES KONVEKTIVEN STANDARD REFLOWLÖTPROZESSES DURCH EINEN LÖTPROZESS MIT ENDOGEN BEHEIZTEN LEITERPLATTEN (NACH DATEN AUS [178])

Die Leistungseinsparungen ergeben sich aus der verbesserten und verlustärmeren Wärmeübertragung durch Konduktion gegenüber der Konvektion und der Verringerung des umgebenden Fluidvolumens im Prozessraum. Zudem werden Aufheiz- und Abkühlvorgänge, welche zu Fertigungsbeginn bzw. bei Fertigungsumstellungen an Konvektionsöfen notwendig werden, reduziert. Die Lötprofilkontrolle erfolgt bei endogener

Erwärmung durch die Leistungsvorgaben an der Heizschicht, so dass lediglich Vorheiztemperaturen im Prozessraum vorgehalten werden müssen, sofern diese notwendig sind. Die Verkleinerung des Prozessraumes ermöglicht neben einer geringeren Ferti-
gungsfläche eine Reduktion des Verbrauchs von Prozessgasen, wie z.B. Stickstoff. Sauerstoffarme Atmosphären dienen bei Lötprozessen der Vermeidung von Oxidation an der Lotschmelze und den erwärmten metallischen Oberflächen. Es wird erwartet, dass sich durch die effizientere Wärmeübertragung die Prozesszeiten beim Löten mit endogenen Schichten auf das mindestens erforderliche zeitliche Prozessfenster, ge-
genüber der konvektiven Durchwärmung, reduzieren lassen. Diese zeitliche Einspa-
rung von thermischen Belastungen würde neben verringertem Oxidwachstum auch die Durchsatzfähigkeit des Lötprozesses erhöhen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich mit der neuen Heizmethode die Notwendigkeit von Sonder- und Selektivlötprozes-
sen reduzieren lässt oder diese in der Durchführung zumindest thermisch aus der Lei-
terplatte unterstützt werden können.

Weitere Einsatzmöglichkeiten von endogen erwärmbaren Leiterplatten in der Prozess-
kette der Baugruppenfertigung werden, neben weiteren Temperprozessen, in der
thermisch unterstützten Aushärtung von Beschichtungsstoffen oder Vergussmassen
gesehen. Üblicherweise werden hierfür auch Systeme, die auf Konvektions- bzw.
Strahlungswärme beruhen, eingesetzt. Die hierfür benötigten Temperaturen liegen, je
nach Beschichtungsstoff, bei bis ca. 80 °C für Trocknungsprozesse und um die 140 °C
für Lackeinbrennprozesse [34]. Die thermischen Anforderungen liegen somit im Durch-
schnitt bei den von Lötprozessen und dürften mit den gleichen Heizschichten durchzu-
führen sein.

Einsatzpotential für
die Baugruppenferti-
gung – Weitere

Als Bestandteil des Qualitätsmanagements in der Elektronikherstellung werden häufig
Stresstests (Run-In/Burn-In) unter erhöhten thermischen Bedingungen durchgeführt.
Ziel ist es, durch Eingangsbelastung und Voralterung, Frühausfälle an fehlerhaften
Baugruppen zu ermitteln. Hierfür ließen sich auch endogen erwärmbare Leiterplatten
einsetzen, um anstelle der üblicherweise verwendeten Burn-In-Öfen, die thermische
Belastungskomponente einzuprägen. Als Applikationsbeispiel für eine künstliche Voral-
terung während eines Burn-In-Test wird in [179] eine Test-Temperatur von 125 °C über
eine Haltedauer von 96 h mit kontinuierlicher Erfassung der elektrischen Parameter
angegeben.

Einsatzpotential für
den Betrieb - Belas-
tungstest

Im Laufe der Betriebszeit von elektronischen Baugruppen gibt es Potential für den Ein-
satz von gezielten Erwärmungsprozessen im Rahmen von Wartungs- oder Reparatur-
arbeiten. Baugruppen, die unter schwankenden oder extremen klimatischen Bedingun-
gen operieren, können sich so selber erwärmen, um z.B. eine bestimmte Mindesttem-
peratur zu erreichen oder um die Anlagerung von Feuchtigkeit auf (Kondensat) oder

Einsatzpotential für
den Betrieb – War-
tung, Reparatur

innerhalb (Diffusion) der Baugruppe zu verhindern. Da elektronische Baugruppen im Betrieb auf eine elektrische Energieversorgung angewiesen sind, ist es naheliegend, das endogene Heizsystem so auszulegen, dass es bei Bedarf von derselben Quelle versorgt werden kann. In komplexen oder für Wartungsarbeiten schwer zugänglichen Systemen kann auch eine bedarfsweise Fernsteuerung der Heizung sinnvoll sein.

Durch die Möglichkeit, elektronische Baugruppen direkt am Einsatzort zu beheizen, ergibt sich weiteres Anwendungspotential für defekt-ausheilende Lötmaßnahmen, welche in [180] als Erhaltungslöten vorgestellt werden. Hierbei werden Lötverbindungen, ggf. unter einer erneuten Zugabe von Flussmittel, wieder-aufgeschmolzen. Ziel ist es, die Restscherfestigkeit der Verbindungen, welche infolge der Alterung durch z.B. Kriechen und Risswachstum gesunken ist, wieder anzuheben, indem die Lötstellendefekte beim Umschmelzen ausheilen. Eine messbare Verbesserung durch Erhaltungslöten wurde in [180] anhand von Scherkraftmessungen an künstlich gealterten Zweipolern, deren Lötverbindungen zum Teil wieder-aufgeschmolzen wurden, nachgewiesen. (Abbildung 3-30)

Einsatzpotential für den Betrieb – Erhaltungslöten

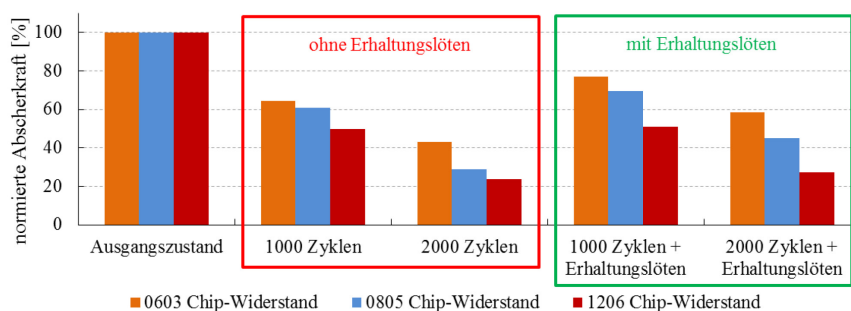


ABBILDUNG 3-30: BEISPIEL FÜR DIE ERHÖHUNG DER RESTSCHERFESTIGKEIT DURCH ERHALTUNGSLÖTEN AN THERMISCH GEALTERTEN ZWEIPOLER-LÖTVERBINDUNGEN (NACH DATEN AUS [180])

Weiteres Anwendungspotential für endogen erwärmbare Leiterplatten wird im Bereich von Testaufbauten für Qualitäts- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen gesehen. Im Abschnitt zur Zuverlässigkeit wurde bereits auf den großen Einflussfaktor von thermischen Belastungen auf verschiedene Systemeigenschaften einer elektronischen Baugruppe hingewiesen. Mit entsprechenden Heizschichten ausgestatte Testboards können sowohl für statische und dynamische thermische Alterungen sowie, in Kombination mit Feuchte, auch für klimatische Belastungen genutzt werden. Es muss aber natürlich sichergestellt sein, dass das jeweilige Heizsystem die vorgesehenen Belastungen übersteht. Weitere mögliche Anwendungsbeispiele sind: Umschmelz- und Benetzungsuntersuchungen, Provokation von thermomechanischen Spannungen und Verformungen, sowie Festigkeitsmessungen unter erhöhter Temperatur, gezieltes und

Einsatzpotential für die Forschung und Entwicklung

beschleunigtes Wachstum von intermetallischen Phasen, Abbildung von thermischen Verlusten für die Entwicklung von Kühlkonzepten u.v.m..

3.4 ANFORDERUNGEN ZUR ERWÄRMUNG MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN

In diesem Abschnitt sollen zusammenfassend die Anforderungen für ein entsprechendes, elektrisch erwärmbares Heizmaterial und für die damit aufgebauten Leiterplatten definiert werden. Aus diesen Vorgaben lassen sich die späteren Versuche sowie die hierfür verwendeten Parameter ableiten.

Allgemein

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erwähnt, wird die Durchführung von Lötprozessen als thermisch anspruchsvollster Prozess für integrierte Heizschichten betrachtet. Unter Berücksichtigung des Temperaturgradienten zwischen Heizschicht und Außenseiten wurde für die Heizschicht selbst eine maximale Temperatur von 250 °C definiert. In Standard-Reflowprozessen werden durchschnittliche Haltezeiten zwischen 30 s bis 60 s oberhalb der Liquidustemperatur des verwendeten Lotwerkstoffes genutzt, um dem Lot ausreichend Zeit für die Benetzung der Oberflächen sowie für die Ausbildung intermetallischer Phasen zu geben. [93] Da für die ‚Zeit über Liquidus‘ auch der Abkühlvorgang zählt, wurde hier eine maximale notwendige Haltedauer der Höchsttemperatur in der Heizschicht von 45 s definiert.

Anforderungsdefinition – thermisch

Die Definition der elektrischen Parameter für eine aktiv beheizte Schicht beginnt mit der verfügbaren Versorgungsspannung. Hinsichtlich möglicher Anwendungen im Automotivebereich erscheint eine Auslegung für maximal notwendige 48 V Gleichspannung sinnvoll. Vor allem im Hinblick auf die aufkommende E-Mobilität gilt das in [181] beschriebene 48 V-Bordnetz als zukunftsweisend und deckt damit bereits verschiedene Heizanwendungen im Komfortbereich der Automobiltechnik ab. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde dieser Bereich auf bis zu maximal 60 V im Bereich der Schutzkleinspannungen erweitert. Um die Heizversuche mit üblichen Labornetzteilen durchführen zu können und um zu verhindern, dass eine zu starke Eigenerwärmung der Zuleitungen auf und außerhalb der Leiterplatte entsteht, wurde eine maximale Stromstärke von 10 A definiert. Zusammen mit der notwendigen Leistungsdichte von $1 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ bis $2 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ und einer maximalen Leiterplattengröße von 160 mm x 230 mm lässt sich somit ein günstiger Bereich für den Schichtwiderstand ableiten.

Anforderungsdefinition – elektrisch

Im Hinblick auf die Integration einer Heizschicht in das Innere einer Leiterplatte mittels Einlaminieren soll die maximale Schichtdicke einer Heizstruktur 50 µm möglichst nicht übersteigen. Hierdurch soll gewährleistet bleiben, dass fertigungstypische Prepregs mit ihrem Harzgehalt in der Lage sind, etwaige Höhenunterschiede auf der Heizlage aus-

Anforderungsdefinitionen – Material

zugleichen, und so ein möglichst fehlstellenfreies Verpressen erreichen. In diesem Zusammenhang müssen mit dem Heizmaterial eine ausreichend hohe Haftfestigkeit auf dem Basismaterial sowie eine gute Kohäsion in der Schicht erzielbar sein, um Delaminationen in dem Schichtaufbau zu vermeiden. Es wurde bereits mehrfach die Möglichkeit des Selektivheizens auf einer Leiterplatte für verschiedene Anwendungen beschrieben, was nur mit elektrisch separat ansteuerbaren Strukturen erreicht werden kann. Auch wenn eine ausreichende Verlustleitung nicht mit den definierten elektrischen Parametern erreicht werden kann, kann eine Umverschaltung mehrerer Segmente sinnvoll sein. Eine weitere Forderung besteht daher in der Segmentier- bzw. Strukturierbarkeit der Heizschicht, entweder während der Applikation oder durch anschließende Bearbeitung.

Die diskutierten Anforderungen sind zusammenfassend in Tabelle 3-3 dargestellt. Die Untersuchungen zur Umsetzbarkeit dieser Anforderungen sind Gegenstand der praktischen Arbeiten hier und werden in Kapitel 5 vorgestellt und diskutiert. Zusammenfassung

TABELLE 3-3: ZUSAMMENFASSUNG DER ANFORDERUNGEN AN INTEGRIERTE HEIZSCHICHTEN IN LEITERPLATTE

Anforderung	Definiertes Ziel
Temperatur	min. 250 °C (für 45 s)
Temperaturprofil	reproduzierbar
Elektrische Spannung (Heizen)	< 48 V (60 V)
Elektrischer Strom (Heizen)	< 10 A
Leistungsdichte	> 1 W/cm ²
Elektrische Stabilität (Feuchte / Temperatur)	reproduzierbar
Segmentierbar	ja
Schichtdicke	max. 50 µm
Strukturierbarkeit (line/space)	500 µm
Korrosiv	nein
Einbettbarkeit	ja (ab Tiefe 50 µm)
Haftfestigkeit/Kohäsion	keine Delamination

4. INDUKTIVES HEIZEN MIT INTEGRIERTEN SUSZEPTORSCHICHTEN

In diesem Abschnitt werden die Möglichkeiten dargelegt, die für eine Erwärmung von Leiterplatten genutzt werden können, indem man die Energieübertragung von elektromagnetischen Wechselfeldern auf feld-einkoppelnde Materialstrukturen (Suszeptoren) nutzt. Neben dem Einsatz von resistiven Schichten – dargelegt im folgenden Kapitel – wird der induktive Ansatz hier als sekundäres Lösungsziel betrachtet. Diese Klassifizierung hat folgende Gründe: Aus Vorbetrachtungen lässt sich bereits ableiten, dass für diese Umsetzung zusätzliche Anlagentechnik benötigt wird. Dazu zählen mindestens ein Induktionsgenerator als Leistungsquelle und eine Induktorspule (Induktor) als feld-erzeugende Einrichtung, die das Bindeglied zum erwärmenden Werkstück darstellt. [182] Des Weiteren ist davon auszugehen, dass auch andere Bereiche und Komponenten der Leiterplatte/Baugruppe dem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt werden. Das kann möglicherweise zu unerwünschten Erwärmungen oder der Induktion von Störspannung führen. Dennoch bietet die Induktion den Vorteil einer kontaktlosen Energieübertragung in die Leiterplatte, wodurch externe/interne Zuleitungen vermieden, sowie separate Suszeptorstrukturen möglich werden.

Abgrenzung der induktiven Erwärmung

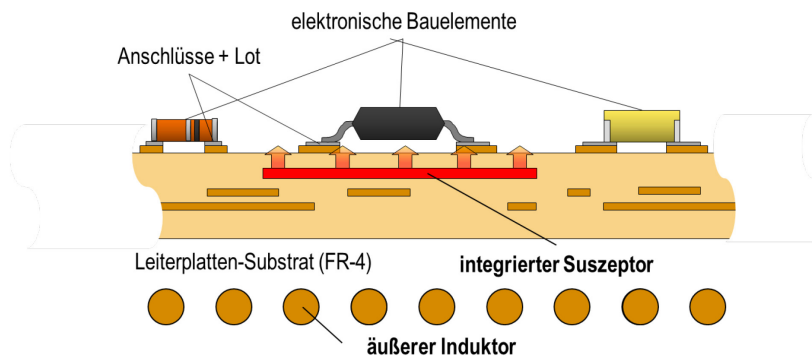


ABBILDUNG 4-1: KONZEPT ZUR ENDOGENEN HEIZUNG VON LEITERPLATTEN MITTELS INDUKTIONSWÄRME

Das grundlegende Konzept für den Einsatz der induktiven Erwärmung zur Beheizung von Leiterplatten ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Energieumwandlung beruht auf verschiedenen Verlustmechanismen und findet in Suszeptorstrukturen statt, deren Material, Form und Größe auf die äußeren Magnetfeldparameter (z.B. Feldorientierung, Frequenz) abgestimmt werden müssen. Hierbei kann der Suszeptor sowohl auf der Außenseite als auch im Inneren des Basismaterials positioniert werden. Der Transport der Wärmeenergie an die gewünschten Bereiche (z.B. Lötstellen) findet dabei primär durch Wärmeleitung im Leiterplattenmaterial statt. Die Leiterplatte mit Suszeptor muss für die Dauer des Heizvorganges möglichst nahe auf bzw. in der Induktorspule und

Konzept zum induktiven Heizen von Leiterplatten

damit im Magnetfeld angeordnet werden, ohne mit dieser in physischen Kontakt zu kommen.

4.1 GRUNDLAGEN ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG

Die Grundlagen für das Verständnis und die Beschreibung von Induktionsvorgängen bilden das Amperesche Durchflutungsgesetz (Gl. 4-1), in dem die Ausbildung eines Magnetfeldes (\vec{H}, \vec{B}) um einen stromdurchflossenen elektrischen Leiter beschrieben wird, und das Faradaysche Induktionsgesetz (Gl. 4-2), welches die Erzeugung eines elektrischen Feldes \vec{E} durch ein sich zeitlich änderndes (oder in Bewegung befindendes) Magnetfeld beschreibt.

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{Gl. 4-1})$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

Für die üblichen metallischen Materialien kann bei der Induktionserwärmung der Term $\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ des Durchflutungsgesetzes vernachlässigt werden, da die Stromdichte \vec{J} um mehrere Größenordnungen höher ist. [183] Detaillierte Beschreibungen der elektromagnetischen Grundlagen finden sich zum Beispiel in [184], [185] und [182].

Abhängig von der Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld und den Suszeptormaterialien können diese in feldschwächende (diamagnetische) und feldstärkende (para-, ferro- und ferrimagnetische) Substanzen unterteilt werden. Quantitativ lässt sich die Magnetisierung eines Materials durch die Permeabilität μ ausdrücken, welche das Verhältnis zwischen der magnetischen Flussdichte B und der magnetischen Feldstärke H definiert. Verknüpft sind diese Parameter über:

Wechselwirkung im
Magnetfeld und
Permeabilität

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (\text{Gl. 4-3})$$

mit $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$ [60] als magnetische Feldkonstante, die den Widerstandswert beschreibt, der bei der Erzeugung eines Magnetfeldes in einem idealen Vakuum auftritt. Die Permeabilitätszahl oder relative Permeabilität μ_r beschreibt den Verstärkungsfaktor der magnetischen Flussdichte gegenüber dem Vakuum. [36] Diamagnetische Materialien können dem äußeren Magnetfeld entgegenwirken und haben daher eine relative Permeabilität $\mu_r < 1$. Bei paramagnetischen Stoffen liegen die magnetischen Momente beliebig im gesamten Material vor. Befindet sich das Material in einem äußeren Magnetfeld, werden die Momente entlang der Feldlinien ausgerichtet

($\mu_r > 1$). Eine andere Konfiguration der inneren Struktur zeigen ferromagnetische Materialien. Hier weisen die magnetischen Momente innerhalb mikroskopischer Bereiche (Weißsche Bezirke) alle in dieselbe Richtung. Innerhalb der resultierenden Grenzen zwischen den einzelnen magnetischen Domänen, den sogenannten Domänen- oder Bloch-Wänden (Dicke ca. $0,1 \mu\text{m}$ [36]), ändert der Magnetisierungsvektor stetig seine Richtung. Dadurch werden lokal stark inhomogene Magnetfelder erzeugt. [185] Die magnetischen Momente im ferromagnetischen Material können bereits durch schwache äußere Felder ausgerichtet werden. Die Ursache dafür ist eine hohe Permeabilitätszahl von $\mu_r \gg 1$. [185] Aufgrund der Ausrichtung der Domänen findet eine Verstärkung des angelegten Magnetfeldes statt. Die Ausrichtung bleibt auch nach dem Verschwinden des äußeren Magnetfeldes bestehen. Dies führt zu einer nichtlinearen Beziehung zwischen dem äußeren Magnetfeld und der inneren magnetischen Flussdichte, der sogenannten Hysterese. In Tabelle 4-1 sind einige Permeabilitätszahlen für unterschiedliche Materialien und Stoffe genannt.

TABELLE 4-1: RELATIVE PERMEABILITÄTEN FÜR VERSCHIEDENE STOFFE [184], [186]

Material	Relative Permeabilität μ_r
Kupfer	$1 \cdot 10^{-5}$
Aluminium	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Zinn	$1,025 \cdot 10^{-5}$
Eisen	300 ... 10.000
Luft	$1,86 \cdot 10^{-6}$
Vakuum	1

Vor allem bei ferromagnetischen Materialien darf μ_r nicht als Konstante angesehen werden, da diese stark feldabhängig ist. [184]

Die Ausrichtung der Weiß'schen Domänen eines ferromagnetischen Materials ändert sich im magnetischen Wechselfeld innerhalb einer Periode. Für diese Umkehrung der Magnetisierung muss Arbeit aufgewendet werden, die im Material in Wärme umgewandelt wird. Die auftretenden Hystereseverluste sind im Allgemeinen proportional zur Fläche innerhalb der Hysteresekurve und verhalten sich linear proportional zur Frequenz. Der Anteil der Hystereseverluste ist von der inneren Mikrostruktur sowie den geometrischen Parametern des jeweiligen Materials abhängig und ist umso geringer, je reiner ein Stoff ist. [187] Ein vergleichsweise einfaches mathematisches Modell für die Beschreibung der Hystereseverluste P_h (für sinusförmige Erregung) liefert [188] mit

Hystereseverluste

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B^n \quad (\text{Gl. 4-4})$$

unter Verwendung der materialabhängigen Koeffizienten k_h und n .

Befindet sich ein elektrisch leitfähiges Material in einem zeitveränderlichen Magnetfeld, so werden elektrische Spannungen induziert, die proportional zur magnetischen Flussdichte sowie zur durchquerten Querschnittsfläche sind. Diese Spannungen rufen umlaufende Wirbelströme hervor (Abbildung 4-2), die eine Joulesche Erwärmung im Material verursachen. Man spricht hierbei von Wirbelstromverlusten. Ist die Ausbildung der Wirbelstrompfade im Material gestört (z.B. durch dünne Schichten oder in Pulververbundwerkstoffen), wird dieser Verlustanteil minimiert. [187] Entsprechend hat auch die elektrische Leitfähigkeit des Materials direkten Einfluss auf die Wirbelstromverluste. Mit der Einführung eines material- und geometrieabhängigen Koeffizienten k_w lässt sich der Anteil der Wirbelstromverluste P_w (für sinusförmige Erregung) nach [187]

Wirbelstromverluste

$$P_w = k_w \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (\text{Gl. 4-5})$$

berechnen.

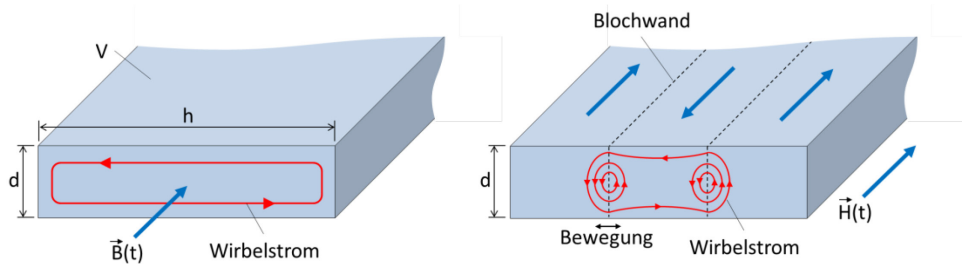


ABBILDUNG 4-2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON WIRBELSTRÖMEN IM MATERIAL (LINKS) UND VON LOKALEN WIRBELSTRÖMEN IN DER NÄHE VON BEWEGTEN DOMÄNENWÄNDEN (RECHTS) (NACH [189])

Ein dritter und zugleich komplexerer Verlustmechanismus sind die Excess- oder Anomalieverluste. Diese entstehen durch die Verschiebung der Domänenwände innerhalb eines ferromagnetischen Materials infolge von ungleichen Magnetfeldbeträgen und Richtungen auf mikroskopischer Ebene in den einzelnen Domänen [189]. Dadurch treten wiederum lokale Wirbelströme auf (Abbildung 4-2 rechts). Genaugenommen sind diese somit ein Teil der Wirbelstromverluste^{VII}, besitzen jedoch eine andere Frequenzabhängigkeit. [190] Der entscheidende Einflussfaktor für den Anteil an Anomalieverlusten im Material ist dessen Korngröße bzw. deren Verhältnis zur Materialdicke. Nach [189] treten in grobkörnigen Materialien höhere Verluste auf als in feinkörnigen. Eine detailliertere Ausführung über verschiedene Erklärungsmodelle und Berechnungen zu diesen speziellen Verlusten ist in [191] zu finden. Analog zu den anderen Verlustmechanismen kann hier ebenfalls die Berechnung über einen materialabhängigen Koeffizienten k_a erfolgen. Für eine sinusförmige Erregung gilt nach [187] die Gleichung (Gl. 4-6).

Anomalieverluste

^{VII} Häufig auch als ‚anormale‘ Wirbelstromverluste bezeichnet

$$P_a = k_a \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

Um die Eignung eines elektrisch leitfähigen Materials für die vorgestellte Anwendung zu bestimmen ist es hilfreich, die Verluste bzw. ihre jeweiligen Anteile berechnen zu können. Die dazu notwendigen Gleichungen basieren vor allem auf den Arbeiten von Steinmetz [188], Jordan [192] und Bertotti [193] und wurden bereits in den jeweiligen Abschnitten vorgestellt. Den genauesten Ansatz liefert [193], in dem alle drei Verlustmechanismen vereint werden und dessen Gleichungssystem als

Berechnungsmodell
der Verluste

$$P_{ges} = P_h + P_w + P_a = k_h \cdot f \cdot B^n + k_w \cdot f^2 \cdot B^2 + k_a \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (\text{Gl. 4-7})$$

beschrieben ist. Weitere Berechnungsmodelle, die z.B. die Flussdichteabhängigkeit des Anomalieverlustkoeffizienten berücksichtigen, werden in [187] diskutiert, sollen aber an dieser Stelle nicht weiter verwendet werden. Die exakte Berechnung der Verlustanteile soll nicht Bestandteil dieser Arbeit sein. Daher soll es für die Untersuchungen genügen, mit (Gl. 4-7) die zu erwartenden Verlustanteile abzuschätzen, um somit die Anteile der Hysterese- und Anomalieverluste, welche im FEM-Modell nicht berücksichtigt werden, als zusätzliche Verlustleistung angeben zu können. Bei den Abschätzungen muss sich auf Herstellerangaben zu den Gesamtverlusten sowie auf den numerisch ermittelten Wirbelstromanteil gestützt werden. (**Anhang B**)

Zum Zwecke der lokalen Erwärmung sollen speziell entworfene Suszeptoren innerhalb oder außerhalb der Leiterplatte integriert werden. Diese dienen der Ankopplung an das Magnetfeld und stellen im späteren Prozess (z.B. Lötanwendungen) als Heizschicht die Wärmequelle dar. Die Geometrie und die stoffliche Zusammensetzung des Suszeptors sind dabei so zu wählen, dass die induktive Eigenerwärmung möglichst auf diesen begrenzt bleibt und nicht in benachbarten Komponenten oder Leiterbahnen entsteht. Um dies zu erreichen, kann der Skin-Effekt ausgenutzt werden. Er bewirkt eine Verschiebung der induzierten Wirbelströme zum Rand der Leitergeometrie, und somit entsteht eine Stromdichteverdrängung an den Rand des Werkstückes. Die Eindringtiefe ist ein Maß für die Tiefe, bei der die Stromdichte auf 37 % ($\frac{1}{e}$ fache) ihres Maximalwertes gesunken ist. [182] Bedingung für eine signifikante Erwärmung ist, dass die Abmessungen des elektrischen Leiters ein Vielfaches seiner Eindringtiefe δ betragen müssen. [194] Die Eindringtiefe kann nach

Selektive Erwärmung
mit Skin-Effekt

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (\text{Gl. 4-8})$$

berechnet werden und ist sowohl von der Frequenz f des magnetischen Wechselfeldes als auch von der Permeabilität μ und der elektrischen Leitfähigkeit σ des Werkstü-

ckes abhängig. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Leitfähigkeit als auch die relative Permeabilität temperaturabhängig und somit nicht-linear sind. In Abbildung 4-3 sind die Verläufe der Eindringtiefe für verschiedene Metalle in Abhängigkeit von der Feldfrequenz dargestellt. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Eindringtiefe immer weiter ab, da die Ströme an den Rand des Leiters gedrängt werden.

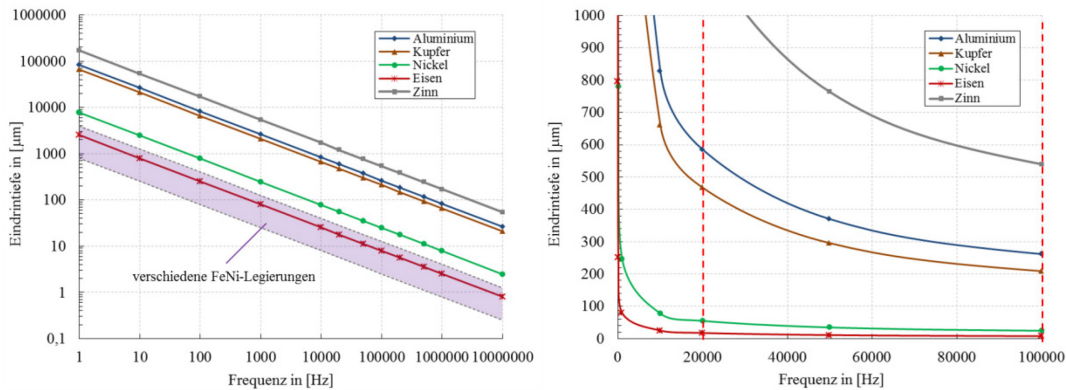


ABBILDUNG 4-3: VERLÄUFE DER EINDRINGTIEFEN FÜR VERSCHIEDENE METALLE IN ABHÄNGIGKEIT DER FREQUENZ DES ÄUßEREN MAGNETFELDES (FÜR $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Die Abmessungen von metallischen Strukturen auf Leiterplatten, wie z.B. Pads und Leiterbahnen, liegen häufig im Millimeterbereich in der x-y-Ebene und im zweistelligen Mikrometerbereich auf der z-Achse. Die Arbeitsfrequenz des Magnetfeldes ist so niedrig zu wählen, dass in diesen Strukturen keine Kopplung mehr stattfindet. Entscheidend ist auch die Ausrichtung des Magnetfeldes gegenüber dem suszeptiven Material. Im transversalen Feld steht der Hauptvektor der magnetischen Feldstärke senkrecht zur x-y-Ebene der Leiterplatten und somit des Suszeptors. Laufen die Magnetfeldlinien hingegen parallel zur Leiterplatten- und Suszeptorfläche, handelt es sich um ein longitudinales Feld. Je nach Feldausrichtung koppeln die Werkstücke über ihre Länge und Breite (Transversalfeld) oder über ihre Dicke (Longitudinalfeld) ein.

Eine weitere wichtige Kenngröße für induktive Erwärmaufgaben ist die Curietemperatur eines ferromagnetischen Stoffes. Oberhalb dieser Temperatur verlieren die Stoffe ihre ferromagnetischen Eigenschaften und ihre relative Permeabilität nimmt einen Wert nahe 1 an. Nach [195] handelt es sich dabei um einen Temperaturbereich, in dem die Weiß'schen Bezirke verschwinden. Dieses Verhalten ist reversibel und kann beispielsweise ausgenutzt werden, um einen bestimmten Temperaturbereich bei der Eigenerwärmung nicht zu überschreiten.

Curie Temperatur

4.2 STAND DER TECHNIK ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON LEITERPLATTEN UND FÜGESTELLEN

Die induktive Erwärmung ist vorrangig in der metallverarbeitenden Industrie zu finden und wird zum Beispiel zum induktiven Härten [183] oder induktiven Schmelzen [196] eingesetzt. In der Elektronikindustrie ist der Einsatz von induktiven Erwärmungsverfahren ebenfalls nicht ungewöhnlich und findet häufig beim Hartlöten oder Schweißen von metallischen Konstruktionsbauteilen Verwendung. Da zum Schweißen höhere Temperaturen benötigt werden als z.B. zum Weichlöten (bis 450 °C), ist die unmittelbare induktive Erwärmung des Werkstückes von Vorteil. Es können hohe Temperaturgradienten erzielt werden, da weder der umgebende Induktor noch ein anderes Heizelement in physischem Kontakt mit dem Werkstück stehen. Die Steuerung erfolgt über die Induktorleistung und es ist kein Ofen notwendig.

Allgemein

Auf Grund dieser Vorteile sind Induktionssysteme auch für das Weichlöten interessant. In der Regel handelt es sich bei induktiven Lötanwendungen um das Fügen elektromechanischer Bauteile (z.B. Stecker), welche selektiv und außerhalb des Standardprozesses verlötet werden. Eine Beispiel für solch eine induktive Selektivlötanlage ist in (Abbildung 4-4) zu erkennen.

Induktives Löten

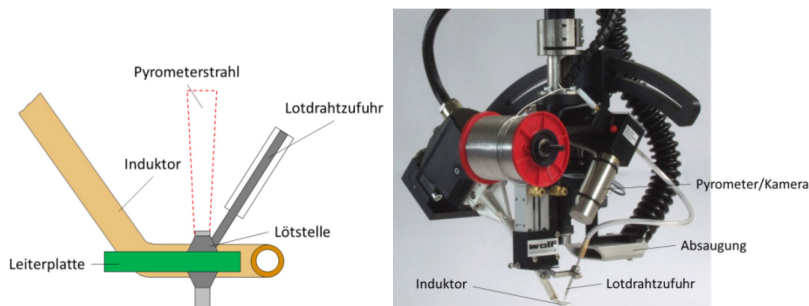


ABBILDUNG 4-4: SELEKTIVE INDUKTIONSLÖTEINHEIT: QUERSCHNITTSSCHEMA (LINKS) UND BAULICHE AUSFÜHRUNG (RECHTS) [197]

In dieser dienen der Bauteilanschluss und/oder das Lot selbst als Suszeptor, welcher durch das elektromagnetische Wechselfeld der umgebenden Induktorschleife erwärmt wird. Dieses und ähnliche Systeme finden sich zum Beispiel in [197], [198], [199] und sind stets für Selektivlötaufgaben entwickelt. Globales Löten ist mit diesen Systemen nicht durchführbar, da zum einen die Fügestelle eine minimale Größe besitzen muss, um eine hinreichende Feldeinkopplung zu gewährleisten, und zum anderen diese von dem Induktor vollständig umschlossen werden müssen. Bei durchschnittlichen SMT-Baugruppen können diese Voraussetzungen kaum erfüllt werden, da die Geometrie der Fügestellen untereinander stark variiert und deren Induktor-Umschluss in der Regel

nicht möglich ist. Zwar findet eine induktive Erwärmung auch statt, wenn sich der Suszeptor nicht im Mittelpunkt der Induktorgeometrie befindet, doch nimmt die Feldstärke und damit auch der Wirkungsgrad außerhalb des Zentrums schnell ab.

Eine solche Variante der induktiven Erwärmung wird in [200] als Patent dargelegt. Hier werden die Induktoren selbst in das Leiterplattenmaterial eingebracht und erzeugen dann jeweils ein Feld, welches eine darüber liegende Fügestelle erwärmen soll (Abbildung 4-5 links). Damit die einzelnen Magnetfelder für die lokale Anschluss-erwärmung nicht an anderen Stellen für eine ungewollte Erwärmung sorgen, wird der Einsatz von hochpermeablen Magnetfeldkonzentratoren vorgeschlagen, die eine partielle Abschirmung ermöglichen. Unklar bleibt allerdings, welche Induktorströme notwendig sind, um eine ausreichende Feldstärke an den Fügepartnern zu erreichen, und ob die Induktorstromdichte eine signifikante resistive Erwärmung in den kupferbasierten Schleifen zur Folge hat.

Induktives Löten mit integrierten Leiterplattenstrukturen

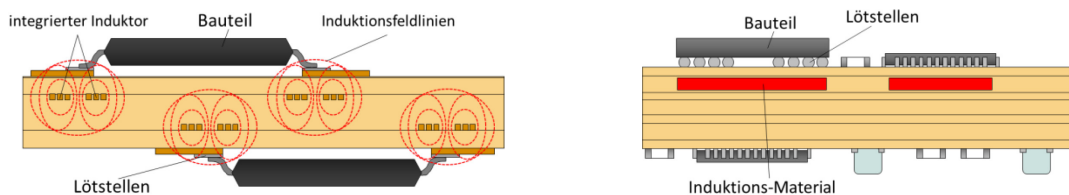


ABBILDUNG 4-5: PRINZIP ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON FÜGESTELLEN MIT FEST VERBAUTEN PLANARINDUKTOREN (LINKS, NACH [200]) UND MIT EINGEBETTETEN FELD-EINKOUPPELNDEN STRUKTUREN (RECHTS, NACH [201])

In einem weiteren Patent von [201] wird der Einsatz von speziellen feld-einkoppelnden Strukturen beschrieben, die in die Leiterplatte eingebettet sind und zum Reparaturlöten von darüber befestigten Bauelementen dienen sollen. (Abbildung 4-5 rechts) Somit ähnelt dieses Konzept der in dieser Arbeit untersuchten Suszeptorlösung. Ein anderer Ansatz wird in [202] durch die direkte induktive Erwärmung von Lotkugeln für BGA's mit einem Durchmesser von $760\text{ }\mu\text{m}$ vorgestellt. In den verwendeten SnAg3,5-Lotlegierungen wird mittels Wirbelstromverlusten in einem 300 kHz Magnetfeld ($\delta_{\text{Lot}} = 350\text{ }\mu\text{m}$) eine Erwärmung über die Schmelztemperatur des Lotes erreicht. Weitere Konzepte zur unmittelbaren induktiven Erwärmung von Lotwerkstoffen werden in den Patentschriften [203] und [204] aufgeführt. In diesen sollen dem Lot ferro- oder ferromagnetische Materialien zugefügt werden. Mit einer hohen Permeabilität können diese mit geringen geometrischen Abmessungen im Lot vorliegen und dort die induktive Wärme abgeben. Da diese Suszeptorpartikel nicht mit umgeschmolzen werden, würden sie nach dem Lötvorgang als Bestandteil der erstarrten Lotlegierungsmatrix vorliegen. Somit wäre theoretisch eine Wiederverwendbarkeit zum induktiven Wiederauf-

schmelzen gegeben. Für den Aufbau von induktiv erwärmbaren Lotpasten sind in Abbildung 4-6 zwei der beschriebenen Konzepte dargestellt.

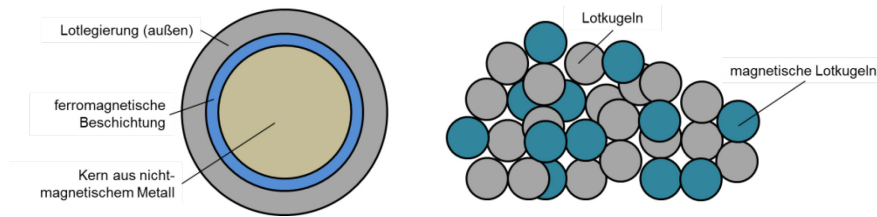


ABBILDUNG 4-6: KONZEPTE ZUM AUFBAU INDUKTIV ERWÄRMBARER LOTPASTEN MIT MEHRSCHTIGEN LOTPARTIKELN (LINKS) UND EINER BEMISCHUNG ZU LOTKUGELN (RECHTS) (NACH [204])

Eine Anwendung dazu findet sich zum Beispiel in den Untersuchungen von [205], in welchen einer SAC305-Lotpaste FeCo-Partikel ($d \sim 38 \mu\text{m}$) in verschiedenen Konzentrationen (2 ew .-% bis 10 ew .-%) beigemischt werden. Das beste induktive Umschmelzergebnis konnte mit 4 ew .-% FeCo in der Paste erzielt werden. Laut [205] wurde das Benetzungsverhalten auf NiAu-Oberflächen nicht beeinträchtigt, wohingegen die Ausbildung von intermetallischen Phasen durch die ferromagnetischen Additive sowie die hohen Abkühlraten verringert wurde.

Ebenfalls diskutiert wird in den Veröffentlichungen die Möglichkeit, die ferromagnetischen Additive so auszuwählen, dass ihre Curietemperatur nahe bei oder knapp über der Liquidustemperatur des verwendeten Lotwerkstoffes liegt, um damit die durch magnetische Verluste erzeugte Maximaltemperatur zu begrenzen. Bei Lötanwendungen werden Temperaturbegrenzungen dieser Art aktuell zum Beispiel in speziellen Hand-Lötgeräten verwendet. Eine Beschreibung zu diesen findet sich in [206].

Temperaturbegrenzung durch Curietemperatur

4.3 VERSUCHSEINRICHTUNG ZUM HEIZEN VON LEITERPLATTEN IM MAGNETISCHEN FELD

Dem Stand der Technik ist zu entnehmen, dass viele Induktionslötanlagen mit speziellen Induktorgeometrien arbeiten, um entweder das Werkstück oder das Lotmaterial direkt zu erwärmen. Hierdurch wird deren Flexibilität stark eingeschränkt. An dieser Stelle soll daher der Ansatz verfolgt werden, mit Standardinduktoren zu arbeiten und gleichzeitig angepasste Suszeptoren einzusetzen, um die gewünschte Wärmequelle darzustellen.

Wahl der Induktoren

Bereits in den Ausführungen zur selektiven Erwärmung wurde beschrieben, dass in dieser Arbeit zwischen dem magnetischen Querfeld (transversal) und dem magnetischen Längsfeld (longitudinal) unterschieden wird. Bei den folgenden Probenbeschreibungen ist immer davon auszugehen, dass die Leiterplatten/Suszeptor-Proben horizontal in den jeweiligen Feldern der Experimentalaufbauten positioniert wurden, da

Magnetfeldorientierung zum Suszeptor

zumindest theoretisch, auch eine Rotation des Induktors und somit der Feldachse denkbar wäre.

Es wurden für beide Feldvarianten separate Versuchsstände mit einer jeweils üblichen Induktorform verwendet. Für die Versuche im Labormaßstab kam ein einfacher Halbbrücken-Oszillator mit Zylinderspule für die Längsfelderwärmung zum Einsatz, und für die Erwärmungsversuche im Quersfeld wurde ein modifizierter Induktionsgenerator mit Flachspule verwendet. In Abbildung 4-7 ist der grundlegende Aufbau eines Induktionsheizsystems dargestellt. Eine genauere Beschreibung der Modifikationen und der Aufbauten kann [207] entnommen werden.

Aufbau eines induktiven Erwärmungssystems

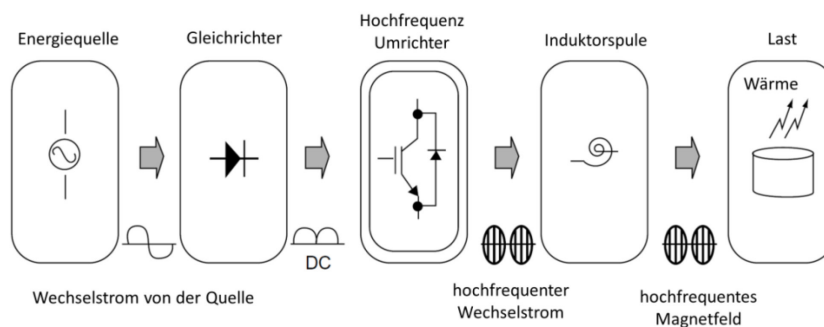


ABBILDUNG 4-7: PRINZIPIELLER AUFBAU EINER INDUKTIVEN ERWÄRMUNGSEINRICHTUNG (NACH [208])

Die Frequenz, mit der das Magnetfeld erzeugt wird, ist einer der entscheidenden Feldparameter. In [194] wird ausführlich beschrieben, dass eine sinnvolle induktive Erwärmung eines Werkstückes erst ab einer bestimmten Grenzfrequenz erreicht wird. Demzufolge wird für das vollständige Durchwärmen eine Frequenz benötigt, welche ein Verhältnis von mindestens 4 zu 1 vom einkoppelnden Werkstückdurchmesser zur Eindringtiefe der Wirbelströme ergibt. Für die Festlegung eines geeigneten Frequenzbereiches lässt sich (Gl. 4-8) verwenden. Die Materialparameter werden vorrangig durch Kupfer ($\mu_r = 0,999990$; $\sigma = 58 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$) vorgegeben, welches als typisches Leiterplattenmaterial keine unerwünschte Erwärmung außerhalb eines Suszeptors erfahren soll. Im magnetischen Längsfeld einer Zylinderspule koppeln die Leiterstrukturen über ihre Dicke ein. Standard Kupferauflagen liegen meist zwischen 18 μm bis 70 μm . Für spezielle Anforderungen an eine hohe Stromtragfestigkeit oder eine gute Entwärmung werden auch Kupferdicken bis 200 μm und dicker eingesetzt. Bei einer Arbeitsfrequenz von 100 kHz beträgt die Eindringtiefe der Wirbelströme bei Raumtemperatur in Kupfer $\delta_{Cu} = 210 \mu\text{m}$. Höhere Frequenzen sollen daher nicht verwendet werden. Z-Achsen intensive Strukturen von Leiterplatten wie Durchkontaktierungen werden hierbei zunächst nicht berücksichtigt. Niedrigere Frequenzen sollen außerdem vermieden werden, denn auf Grund ihrer Temperaturabhängigkeit würde die Eindringtiefe metallischer

Eindringtiefe in Kupfer

Frequenz und Eindringtiefe - Längsfeld

Suszeptormaterialien zu groß werden, um sinnvoll zu heizen. Vor allem ferromagnetische Suszeptoren sind im Längsfeld interessant, da durch die hohe Permeabilität in diesen, die Eindringtiefe um ein Vielfaches geringer ist als in Kupfer. Somit sind relativ dünne Suszeptor Strukturen möglich. Das ist für die Integration in Leiterplatten von Vorteil.

Die Arbeitsfrequenz des Querfeldmessstandes wurde durch einen bereits bestehenden Induktoraufbau mit 20 kHz vorgegeben. Für Kupfer ergibt sich in diesem Fall eine Eindringtiefe von $\delta_{Cu} = 460 \mu\text{m}$, so dass Strukturen kleiner 1 mm bis 2 mm keine nennenswerte Eigenerwärmung mehr aufweisen sollten. Damit lässt sich eine Eigenerwärmung von Leiterzügen und den meisten Lotpads vermeiden. Auf größere Kupferstrukturen, wie Masseflächen oder Thermal-Pads, wurde daher bei der Konstruktion von Probenkörpern verzichtet.

Frequenz und Eindringtiefe - Querfeld

4.3.1 KENNDATEN ZUM ERWÄRMEN IM TRANSVERSALEN MAGNETFELD

Für die Experimente zur Probenerwärmung im Querfeld wurde eine industrielle Induktionskocheinrichtung (MKN Typ 203515) umgerüstet. Die Arbeitsfrequenz des Induktors beträgt 20 kHz und der Generator liefert eine Ausgangsleistung von bis zu 3,5 kW. Eine verbaute Flachspule ($\varnothing \sim 20 \text{ cm}$), welche typisch für induktive Heizfelder ist, diente der Felderzeugung. Die schematische Darstellung der grundlegenden Feldgeometrie einer solchen Spule zeigt Abbildung 4-8.

Versuchseinrichtung zur Querfelderwärmung

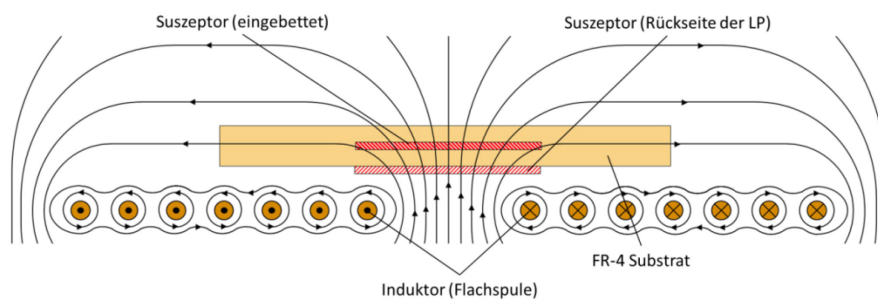


ABBILDUNG 4-8: SKIZZE DER MAGNETFELDGEOMETRIE EINER FLACHSPULE

An dem idealisierten Verlauf der Magnetfeldlinien ist leicht zu erkennen, dass die Hauptkomponenten der magnetischen Feldstärke lediglich in der Induktorachse senkrecht zur Suszeptorfläche stehen. Im Bereich der Spulenachse wird für die Untersuchungen zunächst von einem Quasi-Querfeld ausgegangen, in dem mit entsprechend schmal dimensionierten Proben gearbeitet wird.

Die einzelnen Komponenten vom Induktorsystem des Versuchsstandes zur Querfelderwärmung sind in Abbildung 4-9 dargestellt. Neben den Aufnahmen ist dort zudem das für Vergleichszwecke verwendete 2D-FEM-Modell mit den als idealisiert angenommenen Bereichen dargestellt.

Komponenten des Induktorsystems

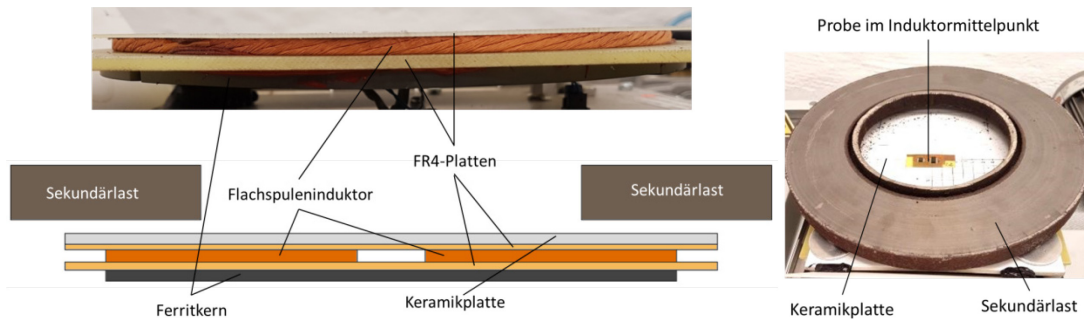


ABBILDUNG 4-9: AUFBAU VON INDUKTOR- UND MESSBEREICH DES QUERFELD-INDUKTIONSSYSTEMS; QUERSCHNITT-ANSICHT DER FLACHSPULE MIT FERRITKERN (OBEN LINKS); DRAUFSICHT MIT EISENRING ALS SEKUNDÄRLAST RECHTS); 2D-SIMULATIONSMODELL (UNTEN LINKS)

Die Flachspule besteht aus verdrehter Kupferlitze und verfügt über $N = 50$ Windungen. Im Modell wurden hierfür zwei Kupferbereiche mit ‚homogenisierter Mehrfachwicklung‘ und einem entgegengesetzt gerichteten Spulenstrom definiert. Zur Ober- und Unterseite ist die Spule mit zwei FR-4-Platten verklebt, an deren unterer Platte sich eine planare Ferritscheibe ($\mu_r \sim 45000$) anschließt. Zur Oberseite wurde eine Keramikplatte (SiO_2) hinzugefügt, um bei Erwärmungsversuchen an oberhalb platzierten Suszeptorproben das FR-4-Material nicht thermisch zu beschädigen. Da es sich bei dem Versuchsstand um ein Kochsystem mit einer Sicherheitseinrichtung zur ‚automatischen Topferkennung‘ handelt, ist ein Feldaufbau durch den Induktionsgenerator nur möglich, wenn das System eine hinreichend große magnetische Last oberhalb der Spule erkennt. Dafür wurde eine massereiche Eisenscheibe ($\mu_r \sim 4000$) als Sekundärlast oberhalb der Keramikplatte platziert, da die untersuchten Suszeptorproben nicht genügen, um die Topferkennung auszulösen. Es gilt hierbei zu beachten, dass die Sekundärlast eine rotationssymmetrische Verzerrung des magnetischen Feldes zur Folge hat. Abbildung 4-10 zeigt den simulierten Unterschied der magnetische Feldstärke sowie deren Feldverlauf mit und ohne Sekundärlast in Luft.

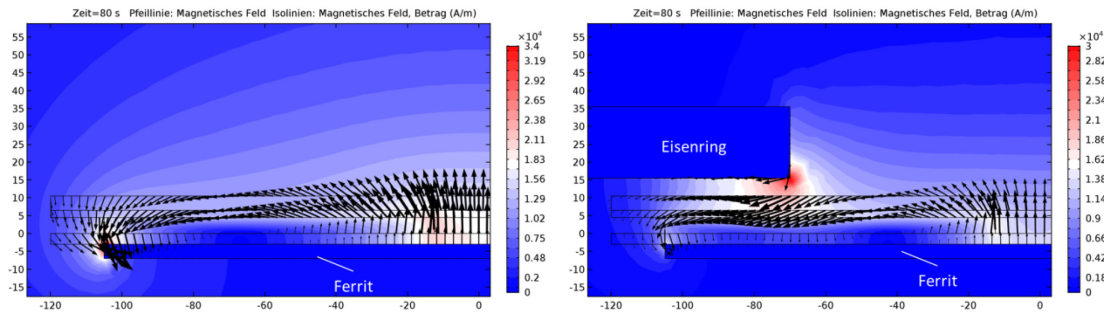


ABBILDUNG 4-10: SIMULIERTE MAGNETISCHE FELDSÄRKE UND FELDSVEKTOREN DER HALBEN FLACHSPULE OHNE (LINKS) UND MIT (RECHTS) SEKUNDÄRLAST BEI EINEM SPULENSTROM VON 28 A

Der Einfluss auf den Bereich der Spulenachse, der hier für die Erwärmung genutzt werden soll, ist jedoch gering, so dass hier innerhalb eines Radius von 12,5 mm von einem quasi-transversalen Verlauf zum Suszeptor ausgegangen wird. Bei einem einfachen praktischen Versuch mit feinen Eisenspänen innerhalb des Induktorfeldes konnte der prinzipielle Feldverlauf bestätigt werden. (Abbildung 4-11)

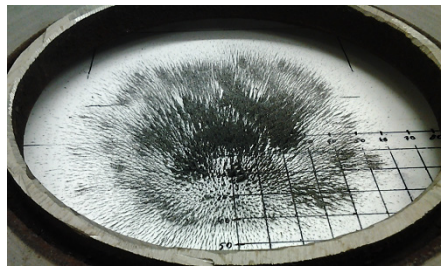


ABBILDUNG 4-11: AUSRICHTUNG VON EISENSPÄNEN IM MAGNETISCHEN FELD EINES FLACHSPULENINDUKTORS

Die thermischen Verluste während der induktiven Erwärmung an einem Suszeptor setzen sich: aus der freien Konvektion an Luft nach oben, der Wärmeleitung in die Keramikplatte und aus Strahlung an der Oberfläche zusammen. Um zu überprüfen, ob diese Mechanismen in dem numerischen Modell hinreichend berücksichtigt werden, wurde eine Vergleichsmessung mit verschiedenen Suszeptoren durchgeführt. Es wurden Kupferzuschnitte (20 mm x 20 mm) unterschiedlicher Dicke mittig im Induktor positioniert und mit der höchsten Leistungsstufe (Spulenstrom ~ 28 A) induktiv erwärmt. Die Gegenüberstellung der praktischen und der simulativen Ergebnisse kann Abbildung 4-12 entnommen werden. Die Temperaturerfassung erfolgt in diesem System mittels pyrometrischer Messungen. Um Fehler durch ungenaue und sich bei der Erwärmung verändernde Emissionskoeffizienten zu vermeiden, wurden alle Proben zuvor mit Graphitlack geschwärzt.

Simulation und praktische Messung

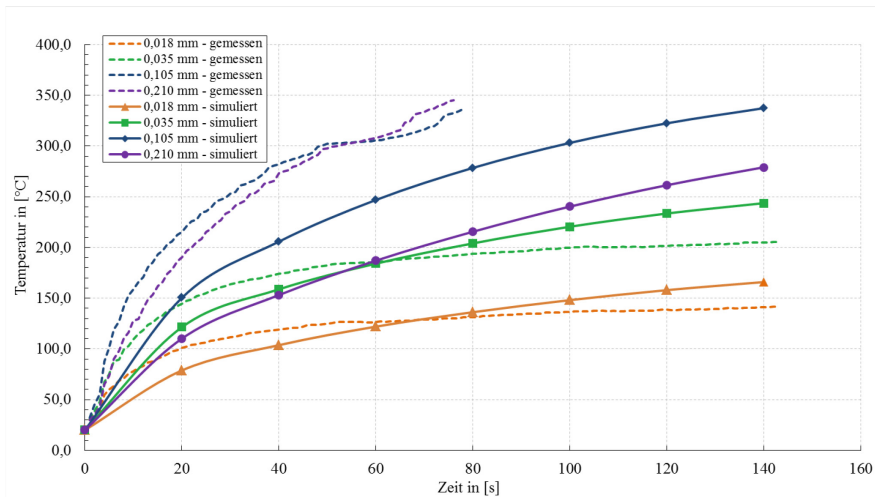


ABBILDUNG 4-12: VERGLEICH ZWISCHEN PRAKTISCHER MESSUNG UND NUMERISCHER SIMULATION ZUR ERWÄRMUNG VON KUPFERSUSZEPTOREN (20 MM X 20 MM) IM QUERFELD EINER FLACHSPULE

Die Abweichungen zwischen Simulation und Realität sind deutlich zu erkennen und können auf mehrere Einflussgrößen zurückgeführt werden. Das numerische Modell besitzt eine idealisierte Geometrie und wurde als 2D-Aufbau konzipiert, welcher nicht in der Lage ist, alle Einflüsse exakt abzubilden. Auch der Wärmeübergang zwischen Unterlage und Suszeptor geht im Modell von einer flächigen Anbindung aus, während es im realen Fall einzelne Auflagepunkte infolge von Oberflächenrauigkeiten und Verwölbungen innerhalb des dünnen Suszeptorbleches gibt. Dennoch wird das Modell als hinreichend angesehen, um grundlegende Abhängigkeiten sowie quantitative Einflüsse zu untersuchen und mit den Messdaten zu vergleichen.

4.3.2 KENNDATEN ZUM ERWÄRMEN IM LONGITUDINALEN MAGNETFELD

Mit dem vorherigen Messstand soll vorrangig die Querfeldkomponente des magnetischen Feldes genutzt werden, um das Verhalten von para- bzw. diamagnetischen Metallen zu untersuchen. Um auch die grundlegenden Abhängigkeiten im longitudinalen Magnetfeld und das Verhalten ferromagnetischer Suszeptoren zu überprüfen, wurde in [207] ein weiterer Induktionsgenerator mit einem kleinen Zylinderspuleninduktor aufgebaut. Laut [182] lassen sich mit einer Kombination aus Ringinduktor und ferromagnetischem Suszeptor Wirkungsgrade bis zu 80 % und mehr erreichen, wohingegen dieser für Kupfer lediglich bei max. 50 % liegt. Das Magnetfeld einer solchen Spule soll sich analog der Skizze in Abbildung 4-13 ausbilden.

Versuchseinrichtung
zur
Längsfelderwärmung

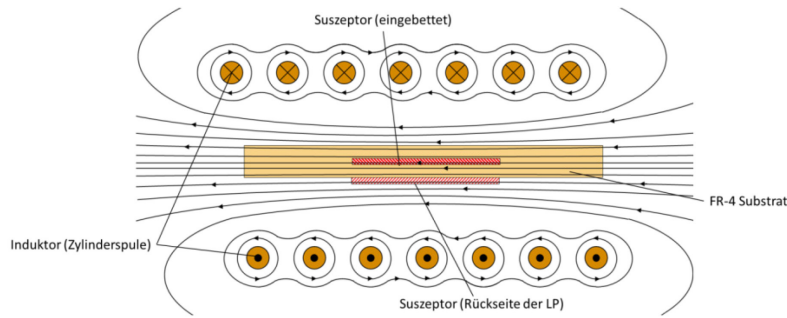


ABBILDUNG 4-13: SKIZZE DER MAGNETFELDGEOMETRIE EINER ZYLINDERSPULE

In der Mittelachse des Induktors kann von einem annähernd parallelen Verlauf der Feldlinien zu einem horizontal liegenden Suszeptor ausgegangen werden. Um keinen allzu inhomogenen Feldverlauf durch den Suszeptor einzubeziehen, soll auch hier mit relativ kleinen Proben gearbeitet werden.

Der schaltungstechnische Aufbau und die für den Betrieb notwendigen elektrischen Parameter des hier verwendeten Induktionsgenerators (Royer-Oszillator) sind ausführlich in [207] beschrieben. Der damit betriebene Zylinderspuleninduktor sowie das hieraus abgeleitete 2D-FEM-Modell sind in Abbildung 4-14 dargestellt.

Induktor und
FEM-Modell

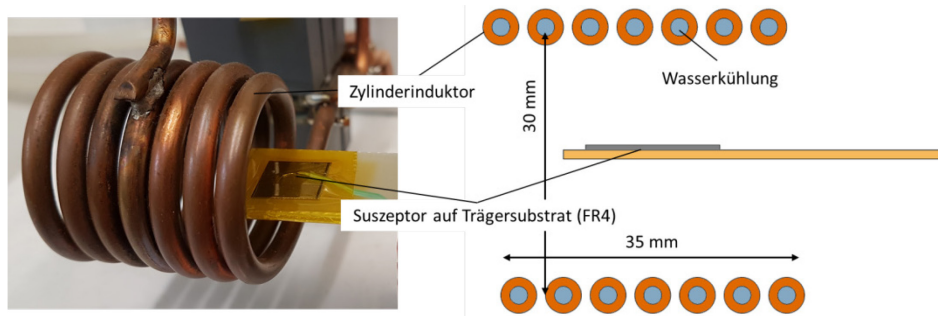


ABBILDUNG 4-14: ZYLINDERSPULENINDUKTOR MIT SUSZEPTORPROBE (LINKS) UND DESSEN 2D-FEM-MODELL (RECHTS) ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG IM MAGNETISCHEN LÄNGSFELD

Die selbstgewickelte Induktorspule besteht aus einem 4 mm starken Kupferrohr, durch dessen Innendurchmesser (2 mm) ein Wasserdurchfluss zur Induktorkühlung erfolgen kann. Durch den relativ kleinen Aufbau ($\varnothing_{\text{Spule}}$ ca. 30 mm) würde die Eigenerwärmung des Induktors im Betrieb (Strom bis zu 50 A) das thermische Verhalten an der Probe zu stark beeinflussen. Entsprechend begrenzt ist der Raum für die Suszeptorproben und das Trägermaterial, so dass hierfür eine maximale Breite von 25 mm über die Mittelachse der Spule definiert wurde. Eine Berührung zwischen Induktorwand und Werkstück soll vermieden werden, da es sonst zu Überschlügen und Fehlerwärmungen kommen kann [182]. Die simulierte Feldverteilung im Inneren der Spule ohne Suszeptor ist in Abbildung 4-15 dargestellt.

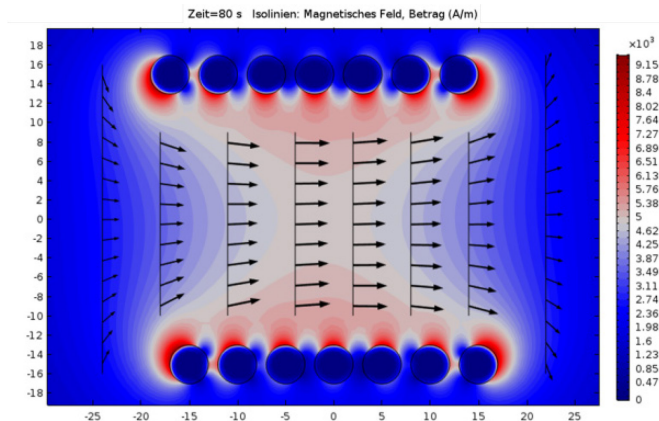


ABBILDUNG 4-15: SIMULIERTE MAGNETISCHE FELDSTÄRKE UND FELDVEKTOREN DER HIER VERWENDETEN ZYLINDER-SPULE BEI EINEM SPULENSTROM VON 48 A

Durch den Aufbau im Labormaßstab und Abweichungen bei den Materialparametern ist davon auszugehen, dass es beim realen Feldverlauf leichte Abweichungen gibt. Die Größenordnung der Magnetfeldparameter konnte durch eine praktische Messung der Flussdichte aber bestätigt werden.

Auch beim Längsfeldmodell soll ein Abgleich zwischen dem FEM-Modell und den praktischen Messungen erfolgen. Auch hier erfolgt die Modellierung in einem hinreichend großen Luftvolumen und der Definition von Konvektions- und Strahlungsverlusten an der Probe. Die praxisnahe Simulation der zu erwartenden Erwärmung ist aber nicht nur von der korrekten Definition der thermischen Verlustmechanismen abhängig: vielmehr sind die am ferromagnetischen Suszeptor zusätzlich auftretenden Hysterese- und Anomalieverluste entscheidend. Diese werden vom Simulationsprogramm zunächst nicht berücksichtigt und müssen daher als zusätzliche Verlustleistung angegeben werden. Die Beschreibung hierzu findet sich in **Anhang B**. Für den Abgleich des Simulationsmodells wurden hier die Verlustdaten eines Elektrostahls (Typ: 20PNF1500 [209]) verwendet. Damit konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den praktischen Messdaten und dem simulierten Temperaturverlauf für ein 50 µm dickes Stahlblech und ein 100 µm dickes Ni80Fe-Blech^{VIII} der Abmaße 15 mm x 15 mm erreicht werden. (Abbildung 4-16)

Simulation und
praktische Messung

^{VIII} Handelsname „Mu-Metall“

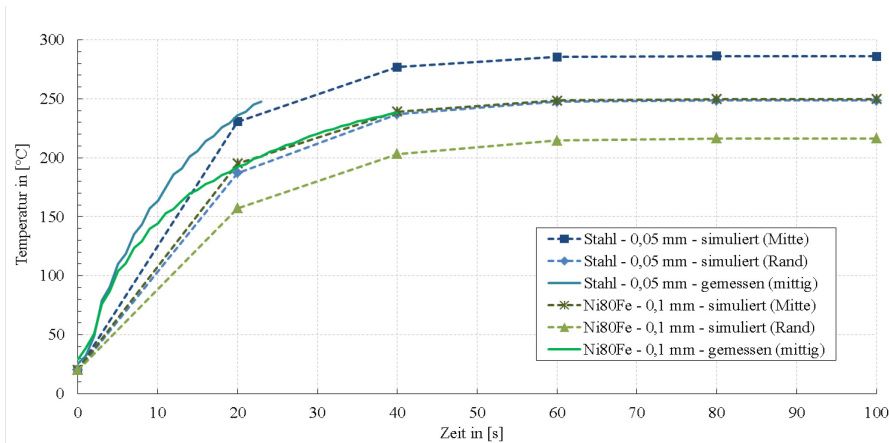


ABBILDUNG 4-16: VERGLEICH ZWISCHEN PRAKTISCHER MESSUNG UND NUMERISCHER SIMULATION ZUR ERWÄRMUNG VON BLECHEN (15 MM X 15 MM) IM LÄNGSFELD EINER ZYLINDERSPULE

Da innerhalb der Zylinderspule stets ein Trägermaterial (hier FR-4) verwendet werden muss, wurde die Messung nur bis ca. 250 °C durchgeführt, um thermische Schäden an diesem möglichst zu vermeiden. Die Aufheizkurven zeigen dennoch eine gute Übereinstimmung mit den numerischen Daten für die beiden Materialien. Für andere ferromagnetische Stoffe können die festgelegten Verlustbeträge nicht ohne weiteres übernommen werden. Da diese nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von der Beschaffenheit (innere Gefügestruktur) und auch der Probengeometrie abhängig sind, ist eine Bestimmung der Koeffizienten für die jeweiligen Hysterese- und Anomalieverluste für die Simulation komplex. Mit dem longitudinalen Versuchsstand soll sich daher vorrangig auf praktische Messdaten gestützt werden, während simulative Ergebnisse lediglich zur Bestimmung einfacher Abhängigkeiten in dem Versuchsaufbau genutzt werden.

Da die Suszeptorproben hier von einem Zylinderspuleninduktor umgeben sind, ist die Temperaturmessung mit optischen Verfahren nicht zweckmäßig. Bei der Verwendung von Drahtthermoelementen muss zudem beachtet werden, dass diese ebenfalls dem Magnetfeld ausgesetzt sind. Das häufig verwendete Typ-K-Thermoelement besteht aus einem ferromagnetischen NiCr/NiAl-Leiterpaar, dessen Eigenerwärmung im Induktor in Abbildung 4-17 dargestellt ist. Dickere Thermopaare koppeln entsprechend stärker ein als dünnere.

Temperaturmessung
im Längsfeld

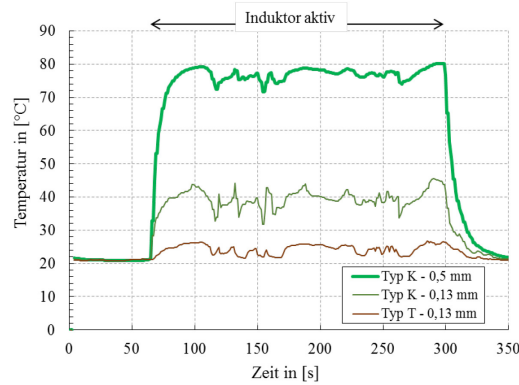


ABBILDUNG 4-17: MESSUNG DER EIGENERWÄRMUNG/STÖREINKOPPLUNG MIT VERSCHIEDENEN THERMOELEMENTEN IM LÄNGSFELDINDUKTOR

Zum Vergleich wurden Messungen mit Typ-T-Elementen durchgeführt. Diese besitzen mit einem CuNi-Leiter ebenfalls eine ferromagnetische Komponente. Nach [210] ist deren Messfehler jedoch vergleichsweise gering, wenn nur ein geringer Leitungsbe-
reich (< 5 cm) dem Feld ausgesetzt ist. Die Messung mit dünnen Typ-T-
Thermoelementen zeigt dennoch einen Störeinfluss des Feldes, der bei voller Induktor-
leistung auf bis zu 15 K ansteigen kann. Als Alternative wurde zusätzlich die Tempera-
turwertbestimmung mittels eines kalibrierten SMD-Widerstandes (100 k Ω , 100 ppm)
genutzt, dessen Messgenauigkeit etwa ± 5 K beträgt.

4.4 MATERIALAUSWAHL FÜR SUSZEPTOREN

Für die Eignung als Suszeptormaterialien wurden verschiedene metallische Werkstoffe
untersucht. Die Auswahl der Materialien basiert zum einen auf ihrer Verfügbarkeit, vor
allem aber auf der Abschätzung ihrer Eindringtiefe gegenüber der jeweiligen Magnet-
feldfrequenz nach (Gl. 4-8).

Auswahl

4.4.1 MATERIALIEN FÜR DIE QUERFELDERWÄRMUNG

Entscheidend für die Erwärmung im magnetischen Querfeld sind die thermischen Ver-
luste in Folge der Wirbelströme im einkoppelnden Material. Wie bereits beschrieben,
bestimmt sich deren Anteil an der Erwärmung anhand der Eindringtiefe in den jeweili-
gen Stoff. Durch die Vorgabe von $f = 20$ kHz des Versuchsaufbaus und $\mu_r \approx 1$ bei
der Verwendung von para- bzw. diamagnetischen Materialien bleibt nach (Gl. 4-8)
noch die elektrische Leitfähigkeit σ als Variable. Deren Einfluss auf die Höchsttempera-
tur eines Suszeptors (20 mm x 20 mm x 0,1 mm) zeigt die Berechnung in Abbildung
4-18.

Para- und diamagne-
tische Materialien

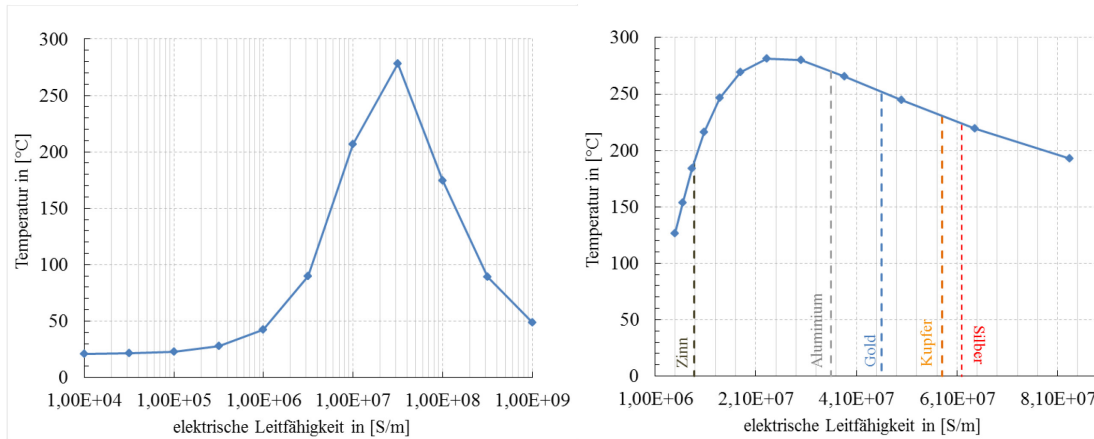


ABBILDUNG 4-18: EINFLUSS AUF DIE TEMPERATUR BEI NUMERISCHER VARIATION DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT EINES SUSZEPTORS (20 MM X 20 MM X 0,1 MM) IM MAGNETISCHEN QUERFELD EINER FLACHSPULE

Mit zunehmender Leitfähigkeit des Suszeptors zeigt sich zunächst ein Anstieg der Höchsttemperatur und somit eine bessere Einkopplung von Wirbelströmen in das jeweilige Material. Zwischen $1 \cdot 10^7 \frac{S}{m}$ und $3 \cdot 10^7 \frac{S}{m}$ bildet sich ein Maximum, welches auf den Punkt der Anpassung zwischen dem Innenwiderstand des als Quelle betrachteten Induktors und dem Lastwiderstand des Suszeptors hindeutet.

Für die Untersuchungen im magnetischen Querfeld wurde hier zunächst Kupfer als das Standard-Material der Elektronik- und Leiterplattenindustrie untersucht. Dieses Material kann entweder als reine Folie oder als Teil des Basismaterials einer FR-4-Leiterplatte verwendet werden. Ein Beispiel für die Erwärmung von Kupfersuszeptoren (20 mm x 20 mm) mit variiertter Dicke wurde bereits in Abbildung 4-12 dargestellt. Für die numerisch bestimmte Eindringtiefe in Kupfer ergibt sich mit den verwendeten Materialparametern ein Wert von $\delta_{Cu_20kHz} = 484 \mu m$ bei 20 °C und $\delta_{Cu_20kHz} = 686 \mu m$ bei 300 °C.

Kupfer

Als zweites Material wurde sich für das paramagnetische Aluminium entschieden, welches man z.B. häufig als Trägermaterial von metallischen Schaltungsträgern (IMS) findet. In Abbildung 4-19 ist erkennbar, dass das Erwärmungsverhalten der Aluminium-Proben vergleichbar ist mit dem der Kupfersuszeptoren.

Aluminium

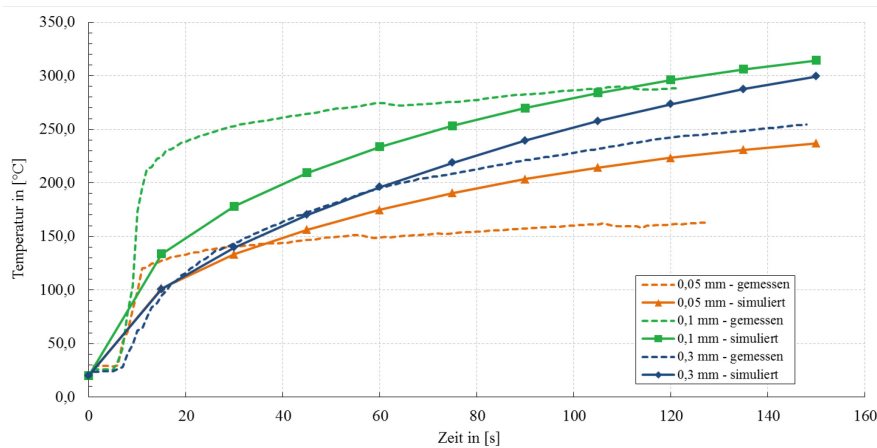


ABBILDUNG 4-19: ERWÄRMUNG VON ALUMINIUMSUSZEPTOREN (20 MM X 20 MM) UNTERSCHIEDLICHER DICKE IM QUERFELD EINER FLACHSPULE

Dass der Temperaturverlauf des 0,3 mm starken Suszeptors zwischen dem 0,05 mm und dem 0,1 mm Suszeptor liegt, deutet auch hier auf einen Umkehrpunkt infolge der Anpassung zwischen Suszeptorwiderstand und Induktor hin. Die Eindringtiefe für Aluminium bei Raumtemperatur wurde mit $\delta_{Al,20kHz} = 593 \mu m$ errechnet und durch die Simulation mit $\delta_{Al,20kHz} = 603 \mu m$ bestätigt. Bei 300 °C beträgt sie ca. 865 μm .

Ferromagnetische Materialien sind für die Verwendung im Querfeld ungeeignet, da sie auf Grund ihrer hohen Permeabilität den magnetischen Fluss führen. Dies hat eine ausgeprägte Mischung von transversalen und longitudinalen Feld innerhalb eines ferromagnetischen Suszeptors in der Achse des Induktors zur Folge. Wegen ihrer deutlich geringeren Eindringtiefe (z.B. aus Simulation: $\delta_{Fe,20kHz} = 16,81 \mu m$) gegenüber para- oder diamagnetischen Stoffen kann eine Einkopplung im Längsfeld auch zu einer effektiven Erwärmung im Material (z.B. Eisen) führen. In der Darstellung von Abbildung 4-20 kann dieses Verhalten anhand einer einfachen Simulation sowie an einer IR-Aufnahme einiger im Raster ausgelegten Eisenbleche betätigt werden. Die Temperaturverteilung zeigt in beiden Versionen ein Maximum im Bereich des longitudinal zur Suszeptorfläche verlaufenden Magnetfeldes und ein Temperaturminimum im Mittelpunkt auf.

Ferromagnetische
Stoffe im Querfeld

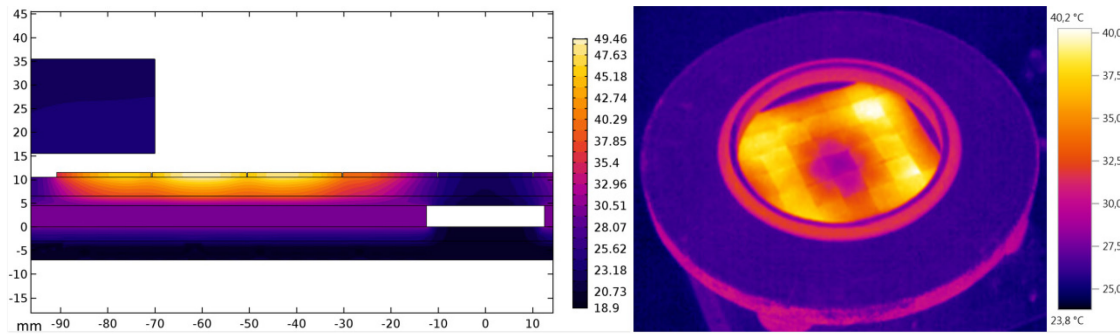


ABBILDUNG 4-20: SIMULATION (LINKS) UND IR-AUFNAHME DER TEMPERATURVERTEILUNG (RECHTS) EINES RASTERS EINZELNER EISENBLECHE IM INDUKTIONSFELD EINER FLACHSPULE

Obwohl eine Erwärmung im äußeren Teil des Flachspuleninduktors erzielt werden kann, sollen ferromagnetische Materialien an diesem Versuchsaufbau nicht weiter untersucht werden. Theoretisch wäre ein kombinierter Einsatz von Para-/Diamagneten im Querfeld-Teil und von Ferromagneten im Längsfeld-Teil einer Feldgeometrie, wie sie hier dargestellt ist, denkbar. So ließe sich zumindest eine Erwärmung über einen größeren Bereich durchführen. Der Einsatz unterschiedlicher Suszeptormaterialien sowie die Abstimmung deren Positionierung zum Feld erscheinen aber nicht zielführend.

4.4.2 MATERIALIEN FÜR DIE LÄNGSFELDERWÄRMUNG

Wie bereits beschrieben, sollen im magnetischen Längsfeld vorrangig ferromagnetische Materialien untersucht werden, deren Einkopplung über ihre Dicke (bei horizontaler Lage im Induktor) auf Grund ihrer hohen Permeabilität mit vergleichsweise dünnen Strukturen möglich ist. Zum Vergleich wurde die Wirbelstromerwärmung von 15 mm x 15 mm Kupfersuszeptoren ($\delta_{Cu_100kHz} = 210 \mu m$) sowie von Aluminium ($\delta_{Al_100kHz} = 281 \mu m$) und einem Zinnbasislot (Materialdaten für Sn60Pb40; $\delta_{SnPb_100kHz} = 1170 \mu m$) unterschiedlicher Stärke im hier vorhandenen Längsfeld simuliert. Die resultierende Temperatur nach 120 s Induktion in Abhängigkeit der Schichtdicke zeigt Abbildung 4-21.

Dia- und paramagnetische Materialien im Längsfeld

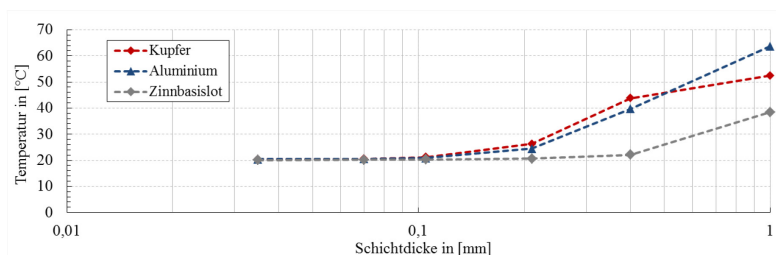


ABBILDUNG 4-21: BERECHNETE WIRBELSTROMERWÄRMUNG PARA- UND DIAMAGNETISCHER SUSZEPTOREN (15 x 15 mm) UNTERSCHIEDLICHER DICKE IM MAGNETISCHEN LÄNGSFELD (NACH 120 s)

Die reinen ferromagnetischen Materialien Eisen und Kobalt finden sich in der Leiterplattentechnik lediglich als geringer Legierungsbestandteil für Hartgoldschichten auf Oberflächenbeschichtungen. [15] Für die hier durchgeführten Untersuchungen diene Eisen als relativ günstiges und gut verfügbares Material für die grundlegende Evaluation der Technologie. Kobalt bietet zunächst keine hierfür interessanten Vorteile und scheidet durch den höheren Preis^{IX} aus. Auch das ferromagnetische Nickel kommt als Legierungsbestandteil von Hartgold zum Einsatz, wird vorrangig aber als Diffusionsbarriereschicht auf Leiterplattenkupfer eingesetzt. Dadurch ist es für die Anwendung als Suszeptormaterial sehr interessant, da die technologischen Prozesse zur Herstellung von Nickelschichten auf Leiterplatten bereits verfügbar sind. Zudem lässt sich auf Nickel bzw. einigen Nickellegierungen eine Benetzung mit Lotwerkstoffen durchführen. [211]

Ferromagnetische
Materialien für die
Längsfelderwärmung

Die Eigenschaft von ferromagnetischen Stoffen, bei Erreichen ihrer Curietemperatur die ferromagnetischen Eigenschaften zu verlieren, bietet zusätzliches Potential für Erwärmungsprozesse. Da bei der Annäherung an den Curiepunkt die relative Permeabilität gegen 1 geht, erhöht sich die Eindringtiefe für Wirbelströme und es kann bei den gegebenen Feldstärken keine hinreichende induktive Erwärmung mehr auftreten. Somit lässt sich die maximal erreichbare Temperatur im Suszeptor auf dessen jeweilige Curietemperatur begrenzen. Nickel hat von den reinen Ferromagneten mit 358 °C, die niedrigste Curietemperatur. Durch den Einsatz spezieller Eisen-Nickel-Legierungen können auch niedrigere Curietemperaturen erreicht werden, welche beispielsweise zur Temperaturbegrenzung bei Weichlötprozessen interessant sind. Beispiele hierfür sind die Legierungen Ni₃₆Fe^X ($T_c = 210\text{ °C}$), Ni₃₆Cr₇Fe^{XI} ($T_c = 180\text{ °C}$) und Ni₃₀Fe^{XII} ($T_c = 55\text{ °C}$) [212]. In Tabelle 4-2 sind einige hier untersuchte ferromagnetische Materialien mit ihrer Curietemperatur sowie typischen relativen Permeabilität laut Datenblättern angegeben. Hierbei muss beachtet werden, dass die Permeabilität nicht nur von der Stofftemperatur, sondern auch von der Flussdichte des Feldes abhängig ist, und daher nur als Richtwert angesehen werden sollte.

Curietemperatur zur
Temperaturbegren-
zung

^{IX} 28,27 €/kg nach www.kobaltpreis.eu (Stand: 15.04.2019)

^X Handelsname „PERMENORM 3601“

^{XI} Handelsname „CHRONOPERM 36“

^{XII} Handelsname „THERMOFLUX“

TABELLE 4-2: ÜBERSICHT DER HIER UNTERSUCHTEN SUSZEPTORMATERIALIEN [212], [213]

Material	Relative Permeabilität	Curie-Temperatur in °C
Eisen (unlegierter Stahl)	bis 4.000	max. 769
Nickel	bis 2.500	358
Ni80Fe	bis 50.000	400
Ni36Fe	bis 4.000	250
Ni44Mo3Fe	bis 100.000	300 – 310

In [207] werden zudem Versuche mit galvanisch abgeschiedenen Suszeptorschichten aus Eisen bzw. Nickel sowie mit gedruckten Suszeptoren aus epoxidbasierten Pastengemischen mit Eisen-, Nickel- bzw. Magnetitpulver vorgestellt.

4.5 AUFBAU VON PROBEN UND GEOMETRISCHE EINFLÜSSE VON SUSZEPTOREN IM INDUKTORFELD

4.5.1 SUSZEPTORPROBEN IM MAGNETFELD EINER FLACHSPULE (QUERFELD)

Die Auslegung der Suszeptorgeometrie hat einen großen Einfluss auf die Ausbildung von Wirbelströmen und damit auf die Erwärmungscharakteristik. Für einen späteren Einsatz auf oder in Leiterplatten ist die Kenntnis über die zu erwartenden Abhängigkeiten zwischen erreichbarer Temperatur sowie deren Verteilung als auch die Abmaße (Länge, Breite und Höhe) des Suszeptors erforderlich. Mit der Variation der elektrischen Leitfähigkeit (Abbildung 4-18) wurde bereits gezeigt, dass es ein Optimum für die Induktion im Bereich der Anpassung der Suszeptorimpedanz gibt.

Geometrische Einflüsse des Suszeptors

Die Impedanz variiert außerdem in hohem Maße mit der Materialstärke des jeweiligen Suszeptormaterials. Mit Aluminium- und Kupfer-Suszeptoren wurde diese Abhängigkeit für den vorliegenden Versuchsaufbau simuliert und mit praktisch ermittelten Werten verglichen. Die Ergebnisse für die Suszeptoren (20 mm x 20 mm) sind in Abbildung 4-22 (links) dargestellt und zeigen für Kupfer ein Optimum nahe 100 µm (bei 300 °C) Dicke. Für Aluminium ist das Maximum marginal zu dickeren Strukturen (~ 160 µm bei 300 °C) verschoben. Es gilt zu beachten, dass sich die Impedanz während der Erwärmung erhöht, wodurch sich leichte Unterschiede ergeben. Für die Einbettung in Leiterplatten sind dünnere Suszeptoren vorteilhaft. Theoretisch ließe sich die Verwendung von dünneren Strukturen (mit ähnlichem Temperaturverlauf) durch den Einsatz von höheren Arbeitsfrequenzen erreichen.

Suszeptordicke

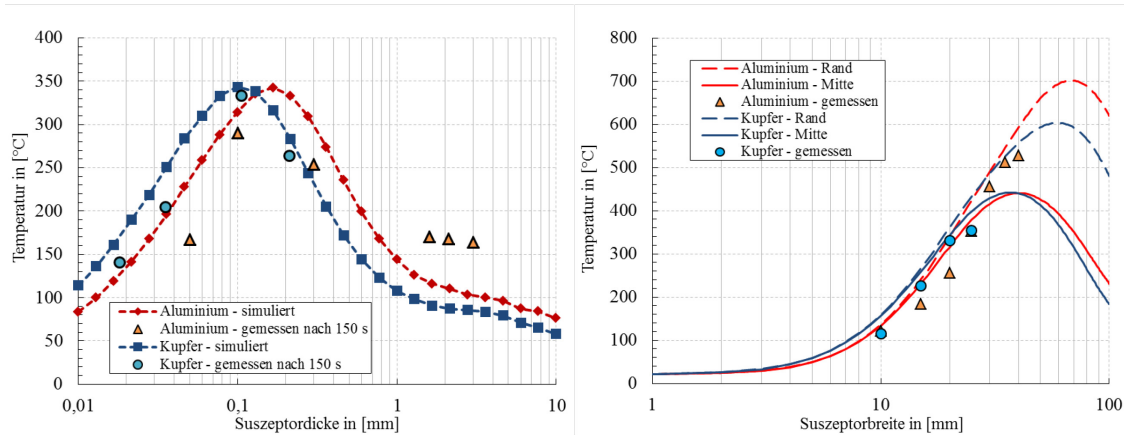


ABBILDUNG 4-22: EINFLUSS DER SUSZEPTORDICKE UND DER SUSZEPTORBREITE EINES QUADRATISCHEN ZUSCHNITTES AUF DIE ERREICHBAREN HÖCHSTTEMPERATUREN IM SUSZEPTOR NACH 150 s IM FELD EINER FLACHSPULE

Aus dem Induktionsgesetz lässt sich zunächst annehmen, dass mit zunehmender Suszeptorfläche ein höherer Leistungsumsatz im Material erfolgt. Um dies zu überprüfen, wurden Messungen an unterschiedlich breiten, quadratischen Suszeptorblechen ($d = 100 \mu\text{m}$) vorgenommen und mit einer numerischen Berechnung verglichen. In Abbildung 4-22 (rechts) sind die Höchsttemperaturen für die jeweilige Suszeptorbreite dargestellt. Da im magnetischen Querfeld die Wirbelströme an den Rand des Suszeptors gedrängt werden, ist die Erwärmung an den Rändern am größten. Bei schlecht angepassten Induktoren kann es hierdurch zu einer Kantenüberhitzung [214] kommen. Bei größeren Suszeptoren tritt dieser Effekt stärker in Erscheinung, was durch den zunehmenden Temperaturgradienten zwischen Rand und Mitte des Materials in Abbildung 4-22 (links) deutlich wird. Eine Veranschaulichung der Temperaturverteilung im Suszeptor ist in **Anhang A** dargestellt.

Suszeptorbreite

Im nächsten Schritt wurden einige Suszeptoren in Kombination mit Leiterplattenmaterial untersucht. Die einfachste Variante besteht in der Verwendung von kupferkaschiereten Basismaterialien, deren Kupferschicht einseitig auf die Abmaße der Suszeptorgeometrie strukturiert wurde. Die Erwärmung von rückseitig aufgetragenen Suszeptoren mit den Temperaturverläufen, gemessen auf der Oberseite der Probe (mittig), zeigen die Diagramme in Abbildung 4-23.

Basismaterial Proben mit Suszeptor

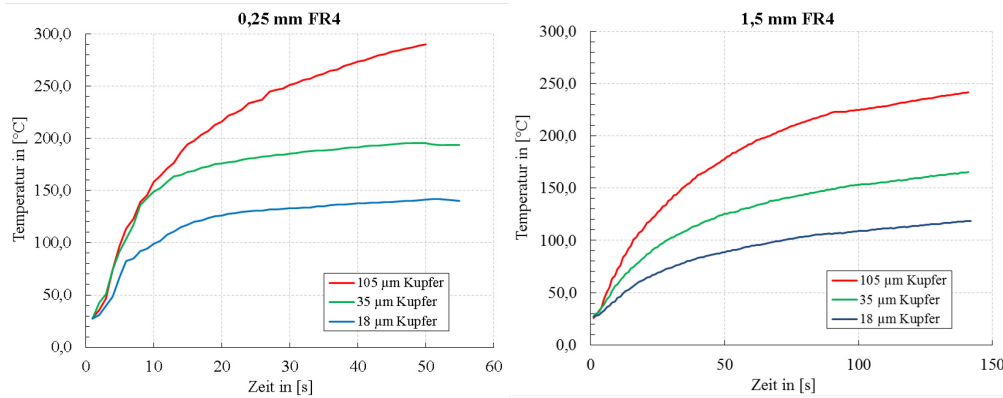


ABBILDUNG 4-23: ERWÄRMUNG VON BASISMATERIAL-PROBEN MIT AUFLAMINIERTEN KUPFERSUSZEPTOREN (20 MM X 20 MM) UNTERSCHIEDLICHER DICKE AUF DER RÜCKSEITE

Es ist ersichtlich und auch leicht nachzuvollziehen, dass mit dünnen Basismaterialstärken (z.B. 0,25 mm) größere Aufheizraten und höhere Maximaltemperaturen erreicht werden können als mit dickeren Materialien (z.B. 1,5 mm) bei identischen Induktoreinstellungen. Als nachteilig bei der Verwendung von 0,25 mm Laminaten hat sich dessen geringe Steifigkeit gegenüber der Wärmeausdehnung des Kupfersuszeptors erwiesen. Obwohl die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer ($\alpha_{CTE} = 17 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$ bis $19 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$ [215]) und FR-4 ($\alpha_{CTE} = 16 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$ bis $20 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$ [215]) nahe beieinander liegen, entsteht bei den Erwärmungsvorgängen des dünnen Laminates eine Verwölbung über die gesamte Probe. Verstärkt wird dieser Effekt durch den Temperaturgradienten zwischen Suszeptor und Basismaterial und das damit verbundene schnellere Aufheizen des gut wärmeleitenden Suszeptors gegenüber dem schlecht wärmeleitenden Epoxid-Glasfaserverbund. Verwölbungen von Leiterplatten bei Aufheiz- und Abkühlvorgängen sind auch ein bestehendes Problem bei Fertigungsprozessen und können z.B. Lötfehler an großflächigen Bauelementen zur Folge haben. [216] Bei der Verwendung von Aluminiumsuszeptoren ($\alpha_{CTE} = 20 \frac{\text{ppm}}{\text{K}}$ [215]) tritt ebenfalls eine Verwölbung in Kombination mit 0,25 mm dünnen Laminaten auf. Bei der Verwendung von Basismaterialstärken $> 0,5$ mm tritt in Kombination mit Suszeptoren deren Kantenlängen < 30 mm liegen, keine erkennbare Deformation mehr auf.

Die vorherige Messung hat gezeigt, dass mit Kupfersuszeptoren mit den Abmaßen 20 mm x 20 mm x 0,1 mm, Temperaturen auf der Oberseite erreicht werden können, welche für Lötprozesse nutzbar gemacht werden können. Die Möglichkeit, die Suszeptoren in das Basismaterial einzubetten, verknüpft die Vorteile einer geringen Laminatdicke zwischen Suszeptor und Oberseite mit einer ausreichend hohen Steifigkeit eines dickeren Gesamtaufbaus. In Abbildung 4-24 sind die erwarteten Temperaturen durch

Einbettung von
Suszeptoren

das Einbetten des Suszeptors in verschiedenen Tiefen eines 1,5 mm dicken Basismaterials dargestellt.

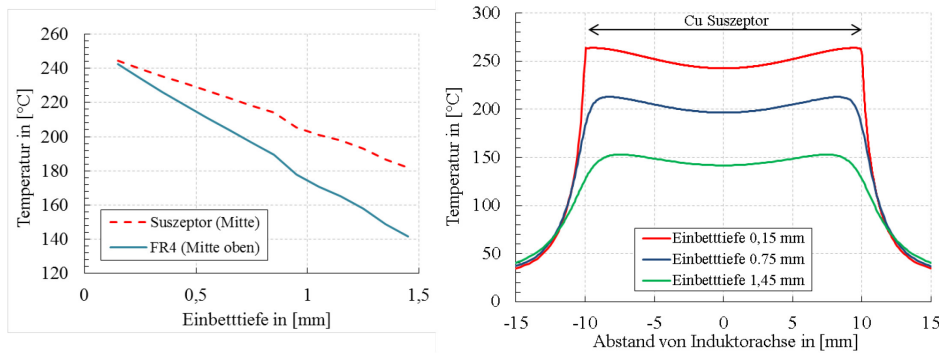


ABBILDUNG 4-24: TEMPERATURUNTERSCHIED ZWISCHEN SUSCEPTOR UND PROBENOBERSSEITE IN ABHÄNGIGKEIT DER EINBETTIEFE IM FR-4 ($D = 1,55$ mm) (LINKS); TEMPERATURVERTEILUNG AUF PROBENOBERFLÄCHE IN ABHÄNGIGKEIT DER EINBETTIEFE EINES SUSCEPTORS (20 mm \times 20 mm \times 01 mm) (RECHTS) [SIMULIERTE WERTE NACH 50 s IM QUERFELD]

Die Abweichungen der Höchsttemperaturen ergeben sich bei gleichen Zeiten durch die unterschiedlichen Flussdichten in den einzelnen Lagen sowie die thermische Isolierung zur Bodenplatte des Aufbaus. Der durch die Kantenerwärmung des Suszeptors hervorgerufene Temperaturgradient über die Probenfläche ist umso ausgeprägter, je geringer der Abstand des Suszeptors zur Oberseite ist.

4.5.2 SUSCEPTORPROBEN IM MAGNETFELD EINER ZYLINDERSPULE (LÄNGSFELD)

Die Einstellung der magnetischen Feldstärke innerhalb des Zylinderspuleninduktors erfolgt über die Variation der DC-Spannungsversorgung des aufgebauten Oszillators. Um ein zuverlässiges Schwingverhalten zu erzielen, waren mindestens 5 V notwendig. Gleichzeitig darf die Versorgungsspannung nicht größer als 14 V sein, um die Gate-Spannung der verwendeten FET's nicht zu überschreiten. [207] Sofern nicht anders angegeben, wurden die Messdaten bei einer Oszillatorspannung von 7 V erzeugt. Mit höheren Spannungseinstellungen konnten in der Regel auch höhere Suszeptortemperaturen erzielt werden (Ausnahme: Erreichen der Curietemperatur).

Spannungsversorgung am
Versuchsstand

Die Suszeptordicke hat bei der Verwendung im Längsfeldversuchsstand einen großen Einfluss auf die sich ausbildenden Temperaturen. Ein Abgleich zwischen praktischen Messwerten und numerischen Daten ist hierbei kaum durchführbar. Durch die zusätzlichen Verlustanteile von Hysterese- und Anomalieverlusten, für die nur begrenzt Daten vorhanden waren, war eine Simulation nicht immer möglich. Für die in **Anhang B** vorgestellte Koeffizientenberechnung und die dort genannten Materialien wurde dennoch ein numerisches Modell erstellt, in welchem die Materialstärke der jeweiligen Suszeptoren (15 mm \times 15 mm) variiert wurde. Die sich ergebenden Temperaturen im Zentrum

Suszeptordicke

der Suszeptoren (nach 60 s) sind in Abbildung 4-25 in Abhängigkeit von ihrer Materialstärke dargestellt.

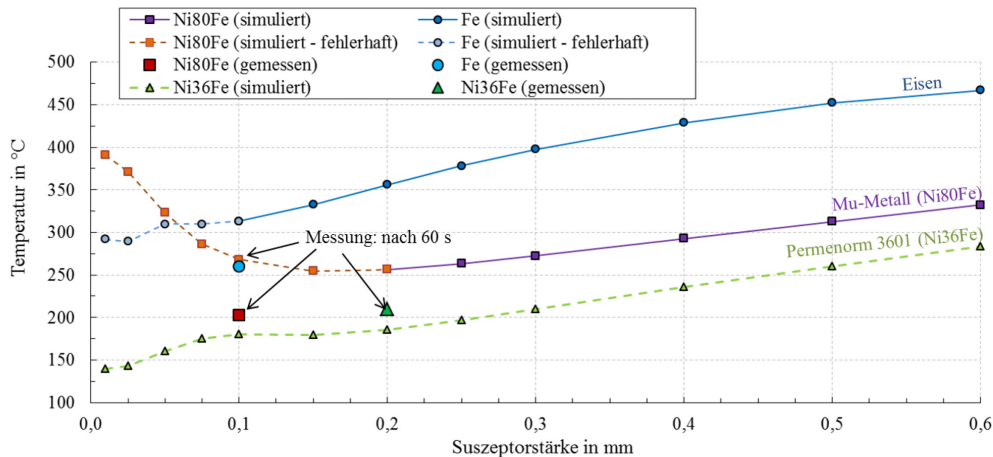


ABBILDUNG 4-25: NUMERISCH BERECHNETE VERLÄUFE SOWIE EXPERIMENTELLE EINZELMESSWERTE FÜR DIE ERREICHTE SUSZEPTORTEMPERATUR NACH 60 S IM LÄNGSFELD IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SUSZEPTORSTÄRKE (KANTENLÄNGEN: 15 MM X 15 MM)

Die numerischen Daten unterhalb einer Schichtdicke von 200 μm für Ni80Fe bzw. unterhalb 100 μm für Eisen werden als fehlerhaft angesehen. Dies wird auf die Definition der Hysterese- und Anomalieverluste, als zusätzliche Verlustleistung im modellierten Suszeptor zurückgeführt, deren Einfluss hier überproportional größer wird als im realen Induktionsfall (s. **Anhang B** – einzelne Verlustanteile). Gestützt wird dies durch die gemessenen Werte bei verfügbaren Blechstärken von 100 μm für beide Materialien. Ähnliches tritt bei der Simulation von Ni36Fe auf, für welches die entsprechenden Verlustkoeffizienten (**Anhang B**) verwendet wurden. Außerdem wird in der Simulation nicht das Erreichen der Curietemperatur berücksichtigt, wodurch für Ni36Fe auch die größeren Suszeptorstärken fehlerhaft sind. In praktischen Messungen konnte der theoretische Curiepunkt für Ni36Fe (250 $^{\circ}\text{C}$) mit $\sim 210 - 230$ $^{\circ}\text{C}$ nicht ganz bestätigt werden. Versuche mit Ni44Mo3Fe-Suszeptoren haben einen Curiepunkt zwischen 300 – 320 $^{\circ}\text{C}$ identifiziert. Das stellt eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten dar.

Die in Abbildung 4-25 dargestellten Kurven machen jedoch deutlich welchen Einfluss die Suszeptorstärke auf die erreichbaren Temperaturen bei der induktiven Erwärmung im Längsfeld hat. Dies lässt sich auch an den gemessenen Suszeptortemperaturen unterschiedlich starker Nickelschichten (Abbildung 4-26) veranschaulichen. Es wurden die Messwerte unterschiedlicher Versuchsreihen zusammenfassend dargestellt.

Beispiel
Nickel-Suszeptoren

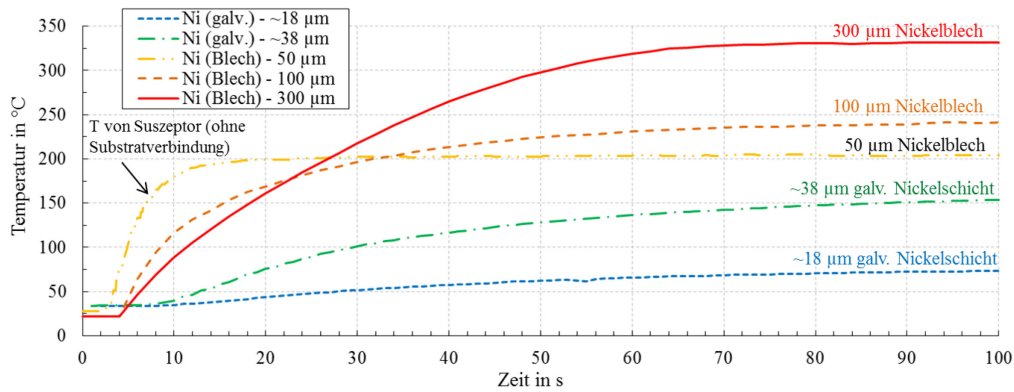


ABBILDUNG 4-26: GEMESSENE TEMPERATURVERLÄUFE IN DER MITTE VERSCHIEDENER NI-SUSZEPTOREN MIT UNTERSCHIEDLICHER SCHICHTDICKE

Bei den 18 µm und 38 µm Verläufen handelt es sich um Nickelschichten, die galvanisch auf dünnen Kupferblechen (100 µm) abgeschiedenen wurden. Das Kupfer selbst hat dabei, laut Referenzmessungen, keinen erkennbaren Anteil an der induktiven Erwärmung. Auch hier ist deutlich die Zunahme der erreichten Temperaturen bei einer Verwendung dickerer Schichten zu erkennen.

Am Beispiel einer numerischen Rechnung, mit 100 µm dicken Eisensuspceptoren bzw. 200 µm dicken MuMetall-Suszeptoren, soll der grundsätzliche Einfluss der Kantenlängen der einkoppelnden Struktur dargestellt werden. In Abbildung 4-27 (links) sind die Variation der Kantenlänge von quadratischen Suszeptoren und die an diesen erreichten Temperaturen nach 120 s im elektromagnetischen Längsfeld abgebildet. Es zeigt sich, dass zwischen 5 mm und 25 mm Kantenlänge ein nahezu linearer Zusammenhang zur erreichten Suszeptortemperatur besteht. Das Abflachen der Kurven bei zunehmenden Kantenlängen deutet jedoch auf ein Maximum im Bereich noch größerer Kantenlängen hin. Qualitativ ähnelt dies dem für das Querfeld (Abbildung 4-22) bestimmten Verlauf.

Suszeptorbreite

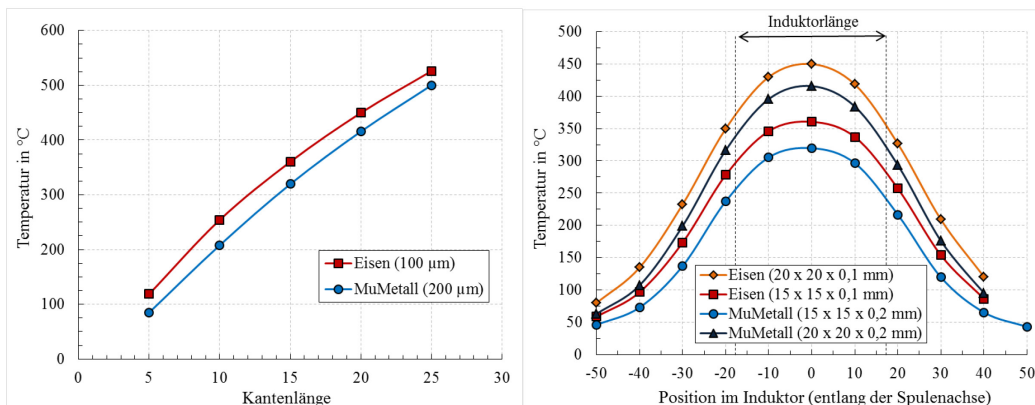


ABBILDUNG 4-27: EINFLUSS AUF DIE MAXIMALE SUSZEPTORTEMPERATUR (NACH 120 s) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KANTENLÄNGE QUADRATISCHER SUSZEPTOREN (LINKS) UND IN ABHÄNGIGKEIT VON DER POSITION DER SUSZEPTOREN IM INDUKTOR (RECHTS) – SIMULIERTE WERTE

In Abbildung 4-27 (rechts) ist außerdem der numerisch ermittelte Einfluss auf die erreichbare Suszeptortemperatur in Abhängigkeit von der Position der Suszeptoren entlang der Mittelachse des Zylinderspuleninduktors dargestellt. Wie bereits in Abbildung 4-15 beschrieben wurde, ist die magnetische Feldstärke im Zentrum des Induktors am größten. Da es sich bei dem Aufbau um eine vergleichsweise kurze Zylinderspule handelt, nimmt die Stärke des Feldes rapide ab, sobald man sich dem Induktorrand nähert bzw. sich außerhalb von diesem befindet.

Position im Induktor

Entgegen dem Verhalten im Querfeld deuten die Versuche im magnetischen Längsfeld auf eine Erwärmung der Suszeptoren aus der Mitte heraus hin. In Abbildung 4-28 ist die numerisch bestimmte Temperaturverteilung auf der Oberseite von FR-4 Proben dargestellt, die im Längsfeld mit einem Ni80Fe-Suszeptor (15 mm x 15 mm x 0,1 mm) erwärmt wurden. Bei der Betrachtung von 1,55 mm starken FR-4 zwischen Suszeptor und Oberseite ergibt sich eine Temperaturdifferenz von bis zu 50 K zwischen Mitte und Rand (Ende vom Suszeptor).

Temperaturverteilung auf Suszeptor und Platine

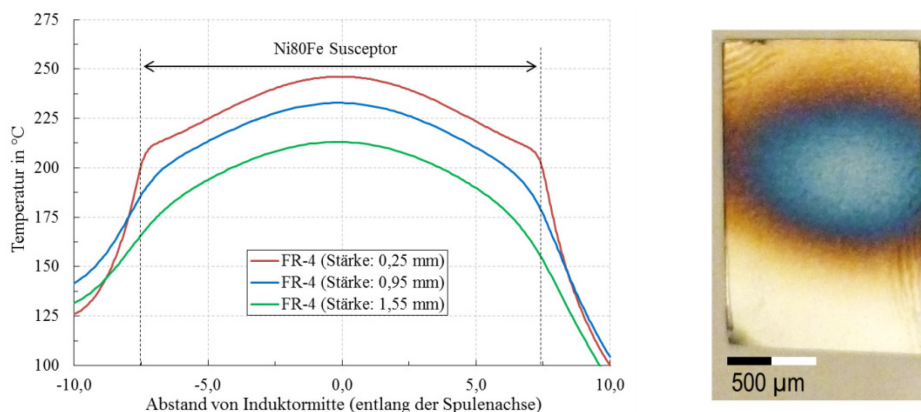


ABBILDUNG 4-28: SIMULIERTE TEMPERATURVERTEILUNG (NACH 120 s) AUF DER OBERSEITE EINER FR-4 PLATINE MIT RÜCKSEITIG BEFESTIGTEN SUSZEPTOR (LINKS); ANLAUFFARBEN AUF EINEM STAHL-SUSZEPTOR NACH DER ERWÄRMUNG IM LÄNGSFELD (RECHTS)

Eine Überprüfung im laufenden Prozess mittels IR-Aufnahmen war nicht möglich, allerdings lässt sich die qualitative Temperaturverteilung in den Suszeptoren anhand der Anlauffarben erkennen (Abbildung 4-28 - rechts). Diese Farben korrespondieren mit den Oxidschichten, die sich in Abhängigkeit der lokalen Temperaturen (und Zeiten) ausbilden. [217]

4.6 EINFLUSS DES MAGNETISCHEN FELDES AUF BAUGRUPPEN

Ein Punkt, der für beide Induktionsfelder gleichermaßen kritisch ist, ist die Möglichkeit der ungewollten Einkopplung des Feldes in bestimmte Komponenten, denn dies kann

zu thermischen oder elektrischen Fehlern (induzierte Spannungen) bis hin zur Zerstörung der Bauteile führen. Viele passive SMT-Bauteile sind geometrisch zu klein, um bei entsprechend einkoppelnden Materialanteilen eine erhebliche Eigenerwärmung zu verursachen. Allerdings haben größere Bauteile, wie z.B. Induktivitäten oder Elektrolytkondensatoren, bei Versuchen im elektromagnetischen Feld eine schnelle Eigenerwärmung gezeigt. So trat beispielsweise bei einem Elektrolytkondensator in Radialbauweise ($47\ \mu\text{F}$) und einem Gehäusemaß von $10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ nach 60 s eine Eigenerwärmung von ca. $180\text{ }^\circ\text{C}$ (Querfeldversuchsstand) auf. Bei IC's wird die Neigung zur Eigenerwärmung im Induktionsfeld von dessen jeweiligem Lead-Frame Material bestimmt. Ferromagnetische Strukturen, wie z.B. Alloy 42/Invar® [218] oder Alloy K/Kovar® [219], sind hier vorrangig zu erwähnen. In Abbildung 4-29 sind exemplarisch einige metallographische Schliffe von Lead-Frames in unterschiedlichen Bauteilen dargestellt.

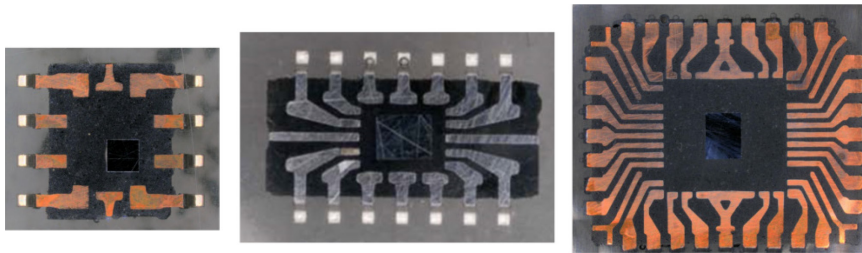


ABBILDUNG 4-29: BEISPIELE VERSCHIEDENER LEAD-FRAME GEOMETRIEN IN INTEGRIERTEN SCHALTKREISEN; SO-8 (LINKS); SO-14 (MITTE); QFN (RECHTS)

Entsprechend dem inneren Aufbau der Schaltkreise kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Zuleitungen zum Chip als auch die Anschlusspins zur Platine einkoppeln können. Allerdings sind deren Abmessungen häufig zu gering, so dass Strukturen aus Kupfer oder anderen para- bzw. diamagnetischen Materialien in den Versuchsständen keine nennenswerte Eigenerwärmung gezeigt haben. Zusätzlich muss beachtet werden, dass gegenüber der in x-y-Achse liegenden Lead-Frames die äußeren Anschlüsse (Leads) häufig eine Vorzugsrichtung in z-Achse aufweisen. Dies kann je nach Felddausrichtung und Material zu unterschiedlichen Arten der induktiven Einkopplung führen. Besonders bei den längeren Leads von THT Bauteilen konnte dies beobachtet werden. In Abbildung 4-30 ist ein DIP-14 Schaltkreis mit einem ferromagnetischen Lead-Frame und dessen Erwärmung im magnetischen Querfeld auf bis zu $80\text{ }^\circ\text{C}$ dargestellt.

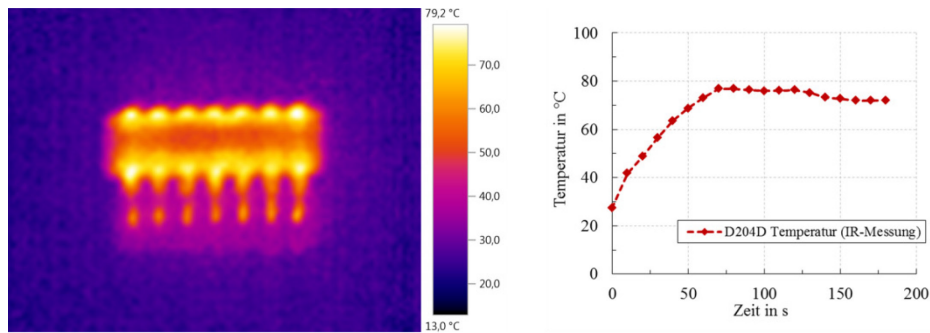


ABBILDUNG 4-30: EIGENERWÄRMUNG IM QUERFELD AN FERROMAGNETISCHEN ANSCHLÜSSEN EINES DIP-14 IC's

Wenn die Temperaturen bei einer induktiven Eigenerwärmung der Bauteile nicht größer sind als die thermischen Belastungen, denen die Bauelemente bei herkömmlichen Reflowlötprozessen (z.B. Zwangskonvektion) ausgesetzt sind, kann sich dies positiv auf das Lötresultat auswirken. Als größte Schwierigkeit bei der Anwendung der hier diskutierten Erwärmungsmethoden wird daher die mögliche Induktion von Spannungen und Strömen in den Schaltkreisen gesehen. In den durchgeführten Lötbeispielen (Abschnitt 6.2.1.1) konnten bei einem anschließenden Funktionstest zwar keine elektrischen Fehler in den verwendeten Komponenten festgestellt werden, aber gemessen an der großen Bandbreite von unterschiedlichen und komplexen Bauelementen auf einer durchschnittlichen Baugruppe erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für Ausfälle. Vor allem wenn man bedenkt welcher Aufwand in der Elektronikfertigung bereits betrieben wird, um Schäden durch elektrostatische Entladungen (ESD) an den Schaltkreisen zu vermeiden, erscheint es kontraproduktiv Baugruppen global einem elektromagnetischen Wechselfeld auszusetzen.

5. RESISTIVES HEIZEN MIT INTEGRIERTEN SCHICHTEN

Dieses Kapitel widmet sich dem technologischen Aufbau und der Qualifikation von resistiven Schichten in Leiterplatten, deren elektrischer Widerstand hoch genug ist, um mit den vordefinierten Strom- und Spannungswerten (Schutzkleinspannung) eine Joulesche Erwärmung zu erreichen. Anders als bei der induktiven Erwärmung, findet hier keine Energieübertragung im elektromagnetischen Wechselfeld statt, sondern eine physische elektrische Kontaktierung der Schichten mit einer externen Gleichspannungsquelle. Zunächst wird auf die dazu untersuchten Materialien sowie deren Applikation und Verarbeitung in der Leiterplattentechnik eingegangen. Im Anschluss sollen die so erzeugten Heizschichten charakterisiert werden.

Inhalt des Kapitels

5.1 PRINZIP UND PARAMETER FÜR DIE ERWÄRMUNG VON RESISTIVEN SCHICHTEN

Die Grundlagen zur Jouleschen Erwärmung wurden bereits in Abschnitt 3.1.1 behandelt. Die Berechnung der Erwärmung einer resistiven Schicht erfolgt mit den Gleichungen (Gl. 3-1) bis (Gl. 3-3). Für eine möglichst gleichmäßige Erwärmung (ohne Berücksichtigung von Randverlusten) ist es zudem erforderlich, äquidistante Elektroden über die gesamte Breite der Schicht zu verwenden, um eine Gleichverteilung der Stromdichte (Voraussetzung: homogene Schichteigenschaften) zu erreichen. Andernfalls würde es zu einer unsymmetrischen Verteilung der Stromdichte kommen, wie das numerische Beispiel in Abbildung 5-1 veranschaulicht. Diese hätte wiederum eine ungleichmäßige Erwärmung bzw. Hotspots zur Folge.

Grundprinzip

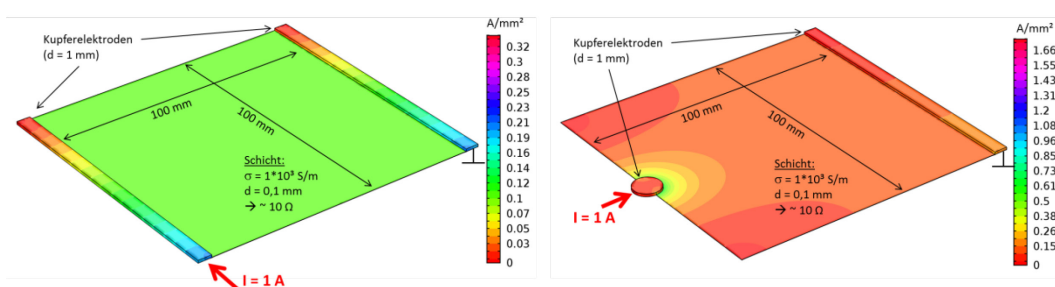


ABBILDUNG 5-1: SIMULIERTE STROMDICHTEVERTEILUNG IN EINER HOMOGENEN WIDERSTANDSSCHICHT IN ABHÄNGIGKEIT DER ELEKTRODENGEOMETRIE; SYMMETRISCHE ELEKTRODEN (LINKS) UND UNSYMMETRISCHE ELEKTRODEN (RECHTS)

Für die effektive Erwärmung einer Heizschicht ist deren Schichtwiderstand entscheidend. Dieser lässt sich entweder über eine Auswahl geeigneter Materialien mit einem entsprechenden spezifischen Widerstand oder über geometrische Anpassungen der Widerstandsstruktur (Schichtdicke, Segmentierung) beeinflussen. Hierfür ist es

Rechnerische Bestimmung der Schichtparameter

zweckmäßig, den notwendigen Widerstandsbereich einer Heizschicht in Abstimmung mit den geometrischen und elektrischen Vorgaben aus Abschnitt 3.4 genauer zu bestimmen. Aus den Vorbetrachtungen lässt sich ableiten, dass bis zu $2 \frac{W}{cm^2}$ an Heizleistung nötig sind, um eine Leiterplatte (von Raumtemperatur $\sim 25^\circ C$) bis auf ca. $250^\circ C$ beheizen zu können. Mit den Gleichungen (Gl. 3-1) und (Gl. 3-3) ist der hierfür maximal verwendbare Schichtwiderstand (ohne Berücksichtigung von Temperatureinflüssen) nach

$$R_{\square} = \frac{U_{max}^2 \cdot b}{2 \left[\frac{W}{cm^2} \right] \cdot A \cdot l} = \frac{U_{max}^2}{2 \left[\frac{W}{cm^2} \right] \cdot l^2} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

zu bestimmen. Dabei sind U_{max} die maximale Versorgungsspannung (hier: 60 V) und l der Abstand zwischen zwei planparallelen Heizschichtelektroden. Ist zum Beispiel eine Leiterplatte mit den Abmessungen 160 mm x 233 mm vollflächig von einer (homogenen) Widerstandsschicht mit $2 \frac{W}{cm^2}$ bei einer maximalen Versorgungsspannung von 60 V zu beheizen, so können Schichtwiderstände von bis zu $3,32 \Omega/\square$ bei Elektroden an den kurzen Rändern bzw. $7,03 \Omega/\square$ bei Elektroden an den langen Rändern (s. Abbildung 5-2) eingesetzt werden.

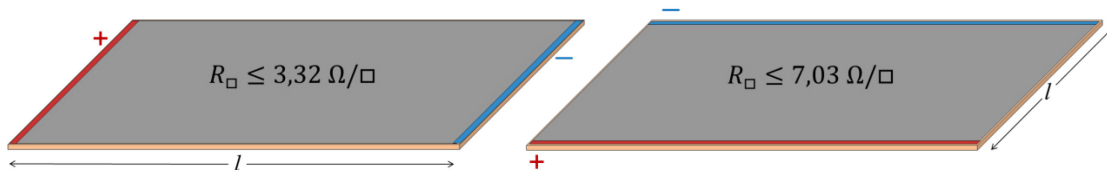


ABBILDUNG 5-2: SCHICHTWIDERSTÄNDE IN ABHÄNGIGKEIT DER ELEKTRODENANORDNUNG BEIM VOLLFLÄCHIGEN HEIZEN EINER DOPPEL-EURO LEITERPLATTE MIT $2 W/cm^2$ UND 60 V DC

Sollte der erforderliche Flächenwiderstand mit den gegebenen Material- und Schichteigenschaften nicht erreicht werden, besteht die Möglichkeit, diesen durch die Änderung des Elektrodenabstandes l anzupassen. Um simultan eine möglichst homogene Heizleistung über die gesamte Fläche zu erzielen, ist eine Segmentierung der Heizschicht in gleichgroße, parallele Segmente sinnvoll. Eine mögliche Anordnung solcher Heizsegmente, unter der Verwendung der vorherigen Parameter, zeigt Abbildung 5-3.

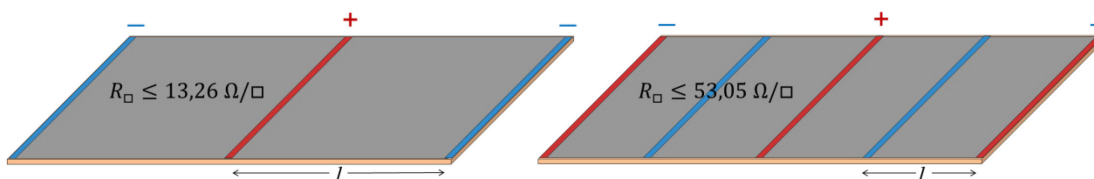


ABBILDUNG 5-3: SEGMENTIERUNG EINER HEIZSCHICHT ZUR ANPASSUNG DES SCHICHTWIDERSTANDES

Hierbei wird ersichtlich, dass der Flächenwiderstand umso größer sein darf, je geringer die resistive Wegstrecke des Stromes ist. Durch diese Reduzierung wird eine entsprechend höhere Anzahl von Segmenten notwendig, um eine gegebene Leiterplattenfläche zu beheizen. Es gilt zu beachten, dass sich dadurch auch der notwendige Gesamtstrom erhöht, der benötigt wird, um in den parallel geschalteten Segmenten die jeweilige Verlustleistung zu erzeugen. Besonders bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird die maximale Stromstärke durch die verfügbaren Labornetzteile begrenzt. Als Obergrenze wurde daher 10 A definiert. In den Diagrammen aus Abbildung 5-4 wird dies für eine 160 mm breite Leiterplatte verdeutlicht.

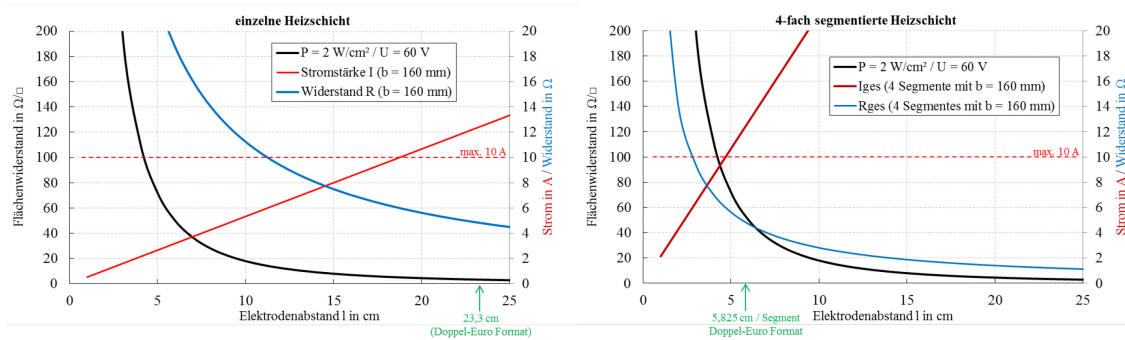


ABBILDUNG 5-4: ERFORDERLICHE SCHICHTWIDERSTÄNDE FÜR DAS ERREICHEN EINER VERLUSTLEISTUNG VON 2 W/CM² (MIT 60 V VERSORGUNGSSPANNUNG) IN ABHÄNGIGKEIT DER SEGMENTLÄNGE L; FÜR EINE EINZELNE HEIZSCHICHT BZW. EIN SEGMENT (LINKS) UND FÜR EINE 4-FACH-SEGMENTIERTE HEIZSCHICHT (RECHTS)

Überträgt man diese Abschätzung auf eine Platine im Doppelseuropaformat, wird ersichtlich, dass mit den definierten Strom- und Spannungsvorgaben die definierten $2 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ nicht zu erreichen sind. Mit 60 V und 10 A lassen sich maximal 600 W von den für dieses Format benötigten 745,6 W erreichen. Zwar ist nicht auszuschließen, dass mit $\sim 1,6 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ eine hinreichende Erwärmung möglich ist, jedoch verringert sich dadurch der vorhandene Toleranzbereich für Temperatureinflüsse (Widerstandsänderung) und Regelungsanwendungen. Daher wird für die folgenden praktischen Untersuchungen auf kleinere Platinengeometrien (z.B. 100 mm x 100 mm) zurückgegriffen. Es wird aber deutlich, dass ein elektrischer Gesamtwiderstand der Heizstruktur im Bereich der Anpassung (hier 6 Ω) sinnvoll ist. Für die in Abbildung 5-4 vorgestellten Beispiele würde dies zu Flächenwiderständen von $\sim 80 \Omega/\square$ bzw. $\sim 5 \Omega/\square$ führen. Dieser Bereich soll daher als Vorgabe für die Materialauswahl dienen.

5.2 MATERIALAUSWAHL

Im folgenden Teil dieser Arbeit werden die für den Aufbau von Heizschichten auf bzw. in Leiterplatten verwendeten Materialien im Einzelnen vorgestellt und beschrieben. Neben den bereits diskutierten Widerstandseigenschaften wurde bei der Auswahl auch auf die Integrierbarkeit des Heizmaterials in bestehende Fertigungsprozesse von Leiterplatten und elektronischen Baugruppen geachtet. Dies beinhaltet die Applizierbarkeit des Materials als Struktur oder Schicht sowie die Verträglichkeit der Schicht mit den restlichen Eigenschaften und Stoffen der gesamten Baugruppe. So sollen von einem potentiellen Heizmaterial keine Schädigungsmechanismen, wie zum Beispiel Korrosion, an den umgebenden Stoffen hervorgerufen werden. Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass keine Stoffe in den Heizschichten vorkommen, deren Verwendung durch gesetzliche Bestimmungen, wie z.B. die RoHS-Richtlinie [92], für die meisten Elektronikgeräte verboten ist.

Auswahlkriterien

5.2.1 METALLISCHE SCHICHTEN UND MÄANDERSTRUKTUREN

Entsprechend der flächigen Geometrie von Leiterplatten wird es sich bei den hier untersuchten Schichten ebenfalls um flächige Heizelemente handeln. Die DIN VDE 0700 Teil 241 unterscheidet zwischen Flächenheizelementen mit vollflächigem Heizleiter (Abbildung 5-5 a)) und Heizern mit einer Leiterbahn oder auch mehreren, voneinander unabhängigen Heizleiterbahnen, die nur einen Teil der Heizfläche (Abbildung 5-5 b)) ausfüllen. [220]

Aufbau von Flächenheizelementen

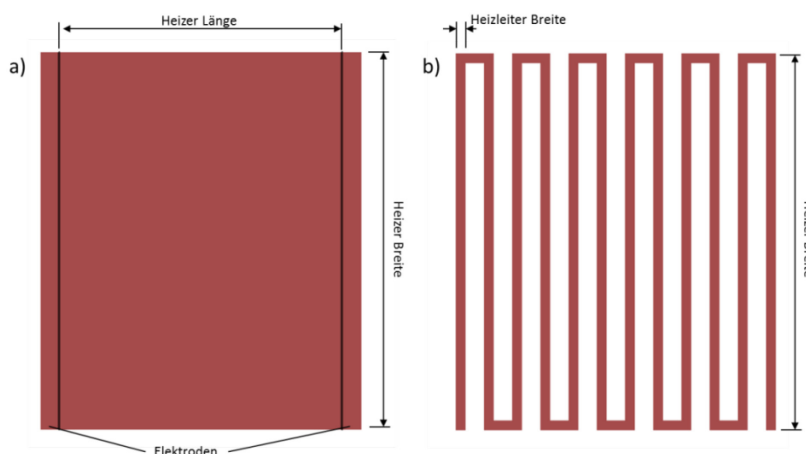


ABBILDUNG 5-5 PRINZIPIELLER AUFBAU VON FLÄCHENHEIZELEMENTEN: A) VOLLFLÄCHIGER HEIZER; B) MÄANDERFÖRMIGER HEIZER [220]

Als Heizmaterial sind vor allem Leiterplatten-Kupfer oder spezielle Heizleiterlegierungen wie. z.B. Konstantan interessant. Um die angestrebten Heizwiderstände zu erreichen, lassen sich mit den üblichen Kupferauflagen ($> 5 \mu\text{m}$) nur Mäanderheizer herstellen. Neben dem Leiterquerschnitt ergibt sich deren elektrischer Widerstand vor allem aus der Länge des Mäanders. Der Vorteil von Konstantan liegt in einem sehr viel geringeren Temperaturkoeffizienten im Vergleich zu Kupfer, wodurch der Widerstandswert im hier angestrebten Temperaturbereich annähernd konstant bleibt. Um auch Flächenheizelemente aus einer metallischen Schicht zu fertigen, deren elektrischer Widerstandswert den hier gestellten Anforderungen entspricht, sind Applikationsverfahren für dünne Schichten erforderlich. Zu den additiven Dünnschichtprozessen zählen zum Beispiel CVD-Verfahren, PVD-Verfahren sowie galvanische Abscheidung. Die Erzeugung dünner Schichten auf Basis dieser Prozesse soll nicht Gegenstand dieser Arbeit sein, da mit FR-4 keine hinreichende glatte Oberfläche zur Verfügung steht und mit dem verfügbaren Magnetronspütern keine gleichmäßige Schichtabscheidung [221] möglich ist. Dennoch wurden in Vorversuchen Flächenheizelemente aus Kupfer bzw. Konstantan mittels Kathodenzerstäubung auf FR-4-Proben aufgesputtert. Um mit diesen den hier geforderten Widerstandsbereich zu erreichen, sind Schichtdicken ($< 100 \text{ nm}$) notwendig. In [71] wird beschrieben, dass für den gleichmäßigen Schichtaufbau nanoskaliger Schichten u.a. eine glatte Substratoberfläche erforderlich ist. Die Rauigkeiten von FR-4-Materialien sind hierfür ungeeignet. In den hergestellten Schichten führten die magnetrongesputterten Schichten zur ungleichmäßigen Erwärmung über die Fläche (ca. $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$) der Heizelemente.

Material und Applikationsverfahren

5.2.2 WIDERSTANDSFOLIEN

Im Wesentlichen bestehen Widerstandsfolien aus einem dünnen, flexiblen Trägersubstrat auf dem sich eine resistive Schicht befindet. Der Widerstandswert wird bei diesen Folien durch die Schichtdicke und den Materialtyp bestimmt. Im Hinblick auf eine spätere Einbettbarkeit der Folien wurde hier nach Foliendicken gesucht, welche nicht größer sind als jene, die bereits in der Standard-Leiterplattenfertigung, in Form von Kupferfolien ($5 \mu\text{m}$ bis $210 \mu\text{m}$ [119]), zum Einsatz kommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Folien mit einer vollflächigen, resistiven Schicht untersucht. Die erste Folie besteht aus einer zweischichtigen Polyimidfolie mit einer elektrisch leitfähigen Schicht auf einer und einem dielektrischen Isolator auf der anderen Seite. (Abbildung 5-6) Die elektrischen Eigenschaften werden durch eine Füllung mit leitfähigem Carbon (Kohlenstoff) bestimmt.

Resistive Folien

Carbon/Polyimid Folie

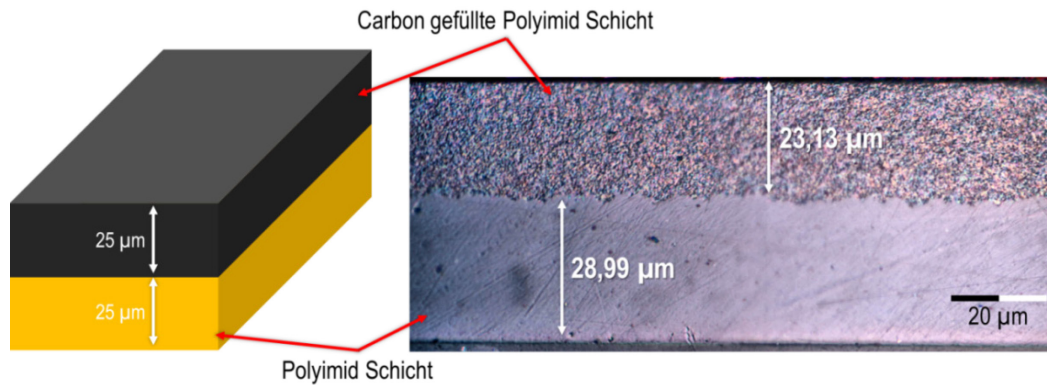


ABBILDUNG 5-6: CARBON/POLYIMID-FOLIE: SCHEMATISCHER AUFBAU (LINKS) UND MIKROSKOPAUFNAHME EINES QUERSCHLIFFS (RECHTS)

Laut [222] erfolgt die Herstellung der Folie durch Koextrusion [223], so dass eine nachträgliche Separierung beider Schichten nicht möglich ist. Über Art und Modifikation der hier enthaltenen Kohlenstoffpartikel werden vom Hersteller keine Informationen gegeben. Anhand der im Querschliff (Abbildung 5-6) zu erkennenden Größenordnung der Carbon-Partikel lässt sich jedoch vermuten, dass es sich um Industrieruß (engl. Carbon Black) handelt. Die meist sphärischen Ruß-Partikel sind typischerweise zwischen 20 bis 300 nm groß und sorgen mit ihren zufällig angeordneten Graphit-Domänen dafür, dass das Material praktisch isotrope Eigenschaften besitzt. [224] In Tabelle 5-1 werden die wichtigsten Eigenschaften der Carbon/Polyimid (C/PI) -Folie zusammengefasst.

TABELLE 5-1: EIGENSCHAFTEN EINER CARBON/POLYIMID-WIDERSTANDSFOLIE [225],

	Trägermaterial	Widerstandsschicht
Material	Polyimid	Carbon gefülltes Polyimid
Schichtdicke	~ 25 µm	~ 25 µm
Flächenwiderstand R_{\square}	$1 \cdot 10^{18}$ [222]	~ 100 Ω/\square
Dauereinsatztemperatur	170 °C [226]; -270 °C bis 240 °C [225]	
Durchschlagsfestigkeit	> 100 kV/mm [222]	-
Elastizitätsmodul	> 2750 MPa	

Die wohl interessanteste Eigenschaft der Folie auf Polyimidbasis ist deren hohe Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu vielen anderen Kunststoffen. Eine Temperaturbelastbarkeit bis 240 °C und unter Ausschluss von Sauerstoff sogar bis 325 °C [225] machen die Folie für anspruchsvolle Heizanwendungen, wie zum Beispiel in der Raumfahrt [227], interessant. Die Untersuchungen von [228] legen zudem nahe, dass zwischen Carbon und Polyimid eine chemische Bindung besteht und dass die Glasüber-

gangstemperaturen für Carbon-Polyimid-Komposite (bis $T_G \approx 580\text{ °C}$) deutlich höher liegen als die für reines Polyimid ($T_G \approx 380\text{ °C}$).

Eine weitere hier untersuchte Widerstandsfolie besteht aus einer Nickel-Phosphor (NiP) -Legierung, die elektrolytisch auf einer Kupferfolie abgeschieden wurde. (Abbildung 5-7) Im Gegensatz zur Polyimidfolie ist bei dieser der Trägerwerkstoff elektrisch leitend, so dass die resistiven Eigenschaften der Widerstandsschicht erst genutzt werden können, nachdem das Kupfer selektiv entfernt wurde. Die Folie wird üblicherweise für die Herstellung von Dünnschichtwiderständen auf Leiterplatten verwendet ([135], [83]). In den Querschliffaufnahmen aus Abbildung 5-7 ist das Treatment der Kupferfolie am Übergang zur NiP-Schicht zu erkennen. Dies ermöglicht beim Pressprozess eine gute Haftung am Basismaterial der Leiterplatte. Üblicherweise liegt die Rauigkeit eines solchen Treatments zwischen $7\text{ }\mu\text{m}$ bis $9\text{ }\mu\text{m}$, während ‚Very-Low-Profile‘ Folien R_z -Werte zwischen $3,5\text{ }\mu\text{m}$ bis $5\text{ }\mu\text{m}$ haben können. [52] Die hier gemessenen Rauigkeitswerte der NiP-Folie betragen $R_a = 0,86\text{ }\mu\text{m}$ bis $0,92\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $R_z = 5,03\text{ }\mu\text{m}$ bis $7,08\text{ }\mu\text{m}$.

Kupfer/Nickel-
Phosphor Folie

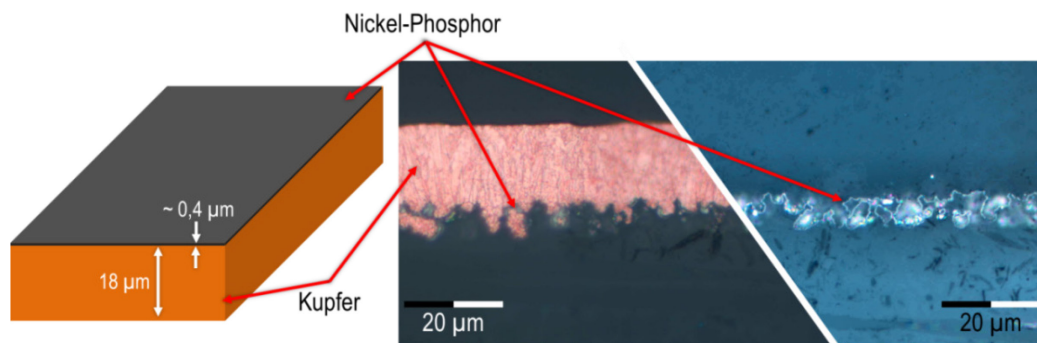


ABBILDUNG 5-7: NiP/KUPFER-FOLIE: SCHEMATISCHER AUFBAU (LINKS); MIKROSKOPAUFNahme EINES QUERSCHLIFFS EINER LAMINIERTEN FOLIE (MITTE) UND EINER FREIGELEGTE NiP-SCHICHT (RECHTS)

Weitere Nickel-Phosphor-Schichten werden häufig als Beschichtung auf Werk- und Halbzeugen zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und des Verschleißschutzes eingesetzt. Im Bereich der Elektronik sind NiP-Schichten in den bereits vorgestellten ENIG- bzw. ENEPIG-Oberflächenmetallisierungen enthalten und dienen ebenfalls dem Schutz der Kupferlage. Obwohl hier meist nur die Nickelschicht bezeichnet wird, ist Phosphor als Reduktionsmittel des Abscheidungsprozesses ein häufiger Legierungsbestandteil. Der Phosphor-Gehalt liegt in diesen Legierungen typischerweise im Bereich von 1 ew .-% bis 13 ew .-% [229] und wird zudem stark von dem Abscheidungsverfahren (chemisch oder elektrochemisch) und dessen Parametern beeinflusst. [230] Die Mikrostruktur der Schichten ist abhängig vom jeweiligen Phosphorgehalt. Man unterscheidet zwischen kristallin (P-Gehalt: 1 ew .-% bis 5 ew .-%), kristallin-amorph (P-

Gehalt: 6 ew .-% bis 9 ew .-%) und amorph (P-Gehalt; 10 ew .-% bis 13 ew .-%). [229] Die Höhe des Phosphorgehaltes hat einen signifikanten Einfluss auf die Materialparameter der Schicht. In [231] wird zum Beispiel die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes vom Phosphorgehalt dargestellt. (Abbildung 5-8)

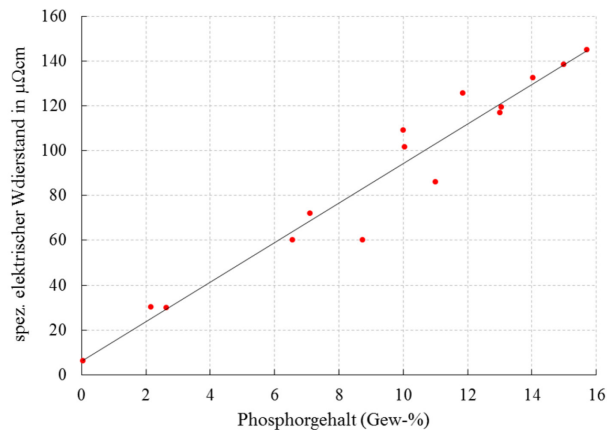


ABBILDUNG 5-8: EINFLUSS DES PHOSPHORGEHALTES AUF DIE RESISTIVITÄT VON NICKEL-PHOSPHOR (NACH [231])

Sowohl die hier durchgeführten Messungen als auch die Herstellerangaben zeigen aber, dass die dabei verwendeten Schichten eine deutlich höhere Resistivität besitzen. Diese liegt um das bis zu 10-fache über den in Abbildung 5-8 dargestellten Werten. Ursachen hierfür werden in [232] beschrieben und können auf die Chemie des Abscheidungsprozesses sowie auf Temperprozesse zurückgeführt werden. Auf die Veränderung des Schichtwiderstandes bei Temperprozessen wird in Abschnitt 5.3.3 näher eingegangen.

Auf Grund ihrer geringen Schichtdicke ist die hier verwendete NiP-Schicht in lichtmikroskopischen Aufnahmen nur schwer zu erkennen. Etwas besser gelingt die Betrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop (Abbildung 5-9).

Analyse der
NiP-Schicht

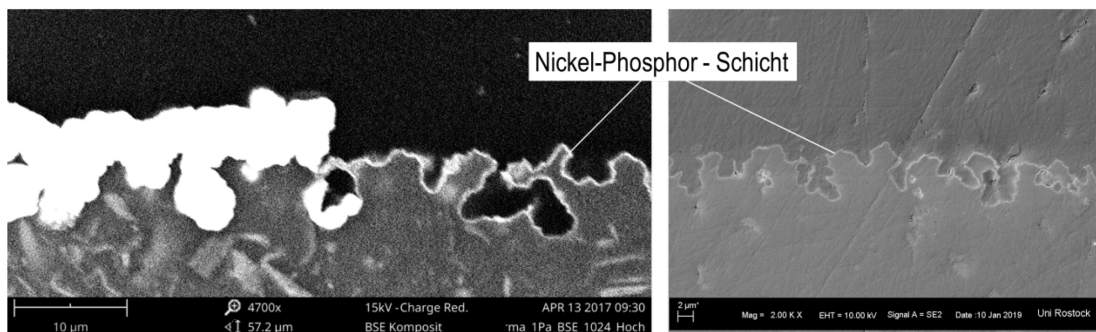


ABBILDUNG 5-9: REM-AUFNAHMEN VON QUERSCHLIFFEN MIT LAMINierter NICKEL-PHOSPHOR-SCHICHT; AM ÜBERGANG ZU KUPFER (LINKS); VOLLSTÄNDIG FREIGEÄTZTE SCHICHT (RECHTS)

Aus den Schliffbildern ist zu erkennen, dass die NiP-Schicht großen topologischen Schwankungen unterliegt, die auf den Treatment-Prozess der tragenden Kupferfolie zurückzuführen sind. Dementsprechend ähnelt die Oberflächenaufnahme der NiP-Schicht (Abbildung 5-10) den bereits in Abbildung 2-9 vorgestellten Cu-Treatment-Topologien.

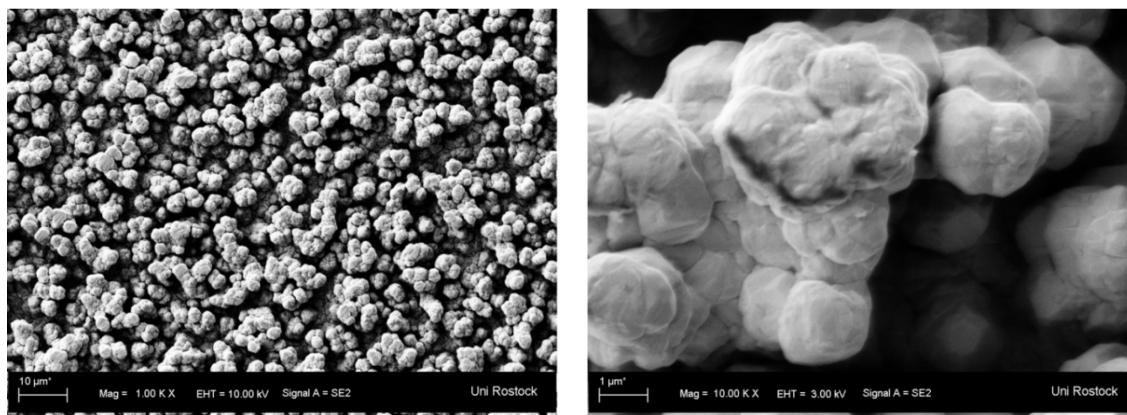


ABBILDUNG 5-10: REM-AUFNAHME EINER NICKEL-PHOSPHOR-BESCHICHTUNG AUF DER TREATMENTSEITE EINER KUPFERFOLIE; 1.000-FACHE VERGRÖßERUNG (LINKS) UND 10.000-FACHE VERGRÖßERUNG (RECHTS)

Zur besseren Einordnung der Legierungsbestandteile in der Widerstandsschicht wurde die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) zur Stofferkennung eingesetzt. Ergebnisse der EDX Messung an den untersuchten NiP-Schichten sind in **Anhang C** dargestellt. Die dabei gemessenen Materialanteile lassen auf eine Nickellegierung mit ca. 6 Gew.-% Phosphorgehalt schließen, deshalb wird hier von einer kristallin-amorphen Gefügestruktur ausgegangen.

Die Eigenschaften der verwendeten Widerstandsfolie sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Da die resistiven Eigenschaften erst nach der Separierung von der Trägerfolie genutzt werden können, sind entsprechende Prozessschritte zur Strukturierung erforderlich. Darauf wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Eigenschaften

TABELLE 5-2: EIGENSCHAFTEN EINER NICKEL-PHOSPHOR/KUPFER-WIDERSTANDSFOLIE [233]

	Trägerfolie	Widerstandsschicht
Material	Kupfer	Nickel-Phosphor (~ 6 Gew.-% Phosphor)
Schichtdicke	~ 18 µm	~ 0,4 µm
Flächenwiderstand R_{\square}	-	25 Ω/\square (+/-5%)

5.2.3 GEMISCHE MIT CARBON-FÜLLSTOFFEN

Der Einsatz von sogenannten Carbon-Leitlacken eröffnet in der Leiterplattenindustrie das Potential, Produktionsprozesse zu vereinfachen und hochpreisige Rohstoffe (z.B. Leitlacke auf Silberbasis) zu substituieren. [52] Häufig werden derartige Lacksysteme mittels Siebdruck appliziert und können als lokale Widerstandsschicht, als Kontaktflächen oder zum Überdruck von gekreuzten Leiterzügen Verwendung finden. [234]

Einsatz von
Carbon-Lacken

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene kommerziell erhältliche Lacke (hier: CP-1 – CP-4) sowie ein Entwicklungsprodukt (hier: CP-5) mit Füllstoffen auf Carbon-Basis auf ihre Eignung als Heizschicht für Leiterplatten untersucht. Die genauen chemischen Formulierungen sowie eventuelle Hilfsstoffe (z.B. Katalysatoren, Netzmittel, Trockenstoffe ...) der genutzten Systeme sind nicht in vollem Umfang bekannt. Eine detaillierte chemische Bewertung der einzelnen Systeme kann und soll daher nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Die wichtigsten Kenndaten der verwendeten Lacksysteme (soweit verfügbar) sind in Tabelle 5-3 zusammenfassend dargestellt. Im Folgenden werden die gewählten Bezeichnungen (CP-x) verwendet, um die jeweiligen Lacksysteme zu benennen. Der Focus der nachfolgenden Untersuchungen lag vor allem auf den Stoffen CP-2 und CP-3. Der Stoff CP-5 befindet sich (beim Abschluss dieser Arbeit) noch in der Entwicklung, so dass Untersuchungsergebnisse mit diesem System nicht mehr in vollem Umfang in diese Arbeit einfließen konnten.

Verwendete Systeme

TABELLE 5-3: KENNDATEN VON UNTERSCHIEDLICHEN CARBON BASIERTEN LACKEN (LT. HERSTELLERANGABEN)

	CP-1 [235]	CP-2 [236]	CP-3	CP-4 [237]	CP-5
Füllstoff	Carbon	Carbon	Carbon	Carbon	Carbon
Bindemittel	n/a	n/a	Acrylat	n/a (2K-System)	Epoxid
Lösemittel	n/a	n/a	Wasser		Wasser
Festkörperanteil	76 – 84 Gew.-%	73 - 77 Gew.-%	54 – 55 % (Carbon + Polymer)	n/a	n/a
Viskosität	22 – 36 Pa*s	15 – 19 Pa*s	3 – 5 Pa*s	10 – 30 Pa*s (vermischt)	n/a
Dichte	1,32 – 1,42 g/cm ³	1,22 – 1,32 g/cm ³	1,29 g/cm ³	n/a	n/a
Flächenwiderstand R_{\square} (bei Schichtdicke)	~ 14 Ω/\square (ca. 25 μm)	10 - 20 Ω/\square (25 – 50 μm)	5 – 16 Ω/\square (20 – 40 μm)	100 Ω/\square (~18 – 25 μm)	20 – 40 Ω/\square
max. Betriebstemperatur	150 °C	150 °C	70 °C	n/a	> 150 °C

Die prinzipielle Zusammensetzung der genutzten Lacksysteme besteht aus flüchtigen Anteilen (Lösemitteln) und nichtflüchtigen Anteilen (Bindemittel und Füllstoffe). (Abbildung 5-11)

Bestandteile der Lacksysteme

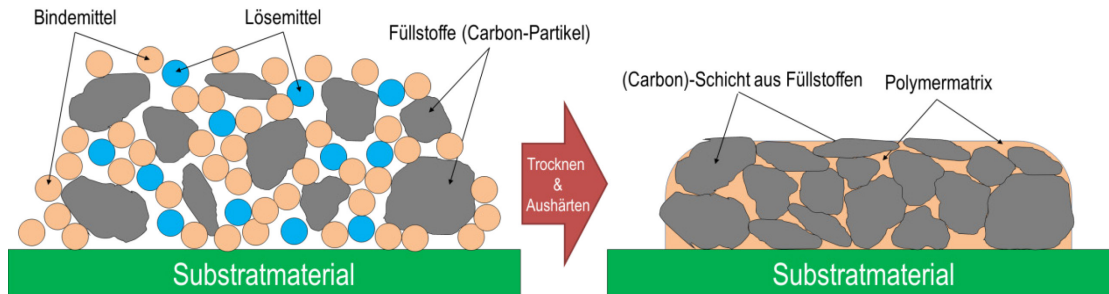


ABBILDUNG 5-11: SCHEMATISCHER AUFBAU EINES CARBON-LACKGEMISCHES UND EINER CARBON-SCHICHT (AUSGEHÄRTET)

Zu den grundlegenden Bestandteilen gehört in jedem Fall ein Bindemittel, welches den Filmbildner bzw. das Lackharz (z.B. Acrylat, Epoxid,...) umfasst und als Teil der getrockneten bzw. ausgehärteten Schicht Eigenschaften wie z.B. Adhäsion, Festigkeit und Beständigkeit gegen atmosphärische Einflüsse bestimmt. [47] Es kann davon ausgegangen werden, dass in den Bindemitteln der hier verwendeten Lacksysteme weitere Additive in kleinen Mengen enthalten sind, die die grenzflächenphysikalischen Eigenschaften (z.B. Benetzung von Substrat und Füllstoff) sowie die rheologischen Eigenschaften (z.B. Druckbarkeit) beeinflussen. Bei dem Bindemittel von CP-3 handelt es sich um ein Acrylatharz, dessen Vorteile in einer schnellen physikalischen Trocknung und einer guten Chemikalienbeständigkeit [47] liegen. Die Glasübergangstemperatur verschiedener Acrylate liegt zwischen 90 °C bis 110 °C. Sie ist damit niedriger als für die meisten Epoxide. Das Harzsystem der Gemische CP-1, CP-2 und CP-4 ist nicht näher bekannt. Auf Grund der Verarbeitungseigenschaften wird aber angenommen, dass es sich bei den Systemen um Lacke auf Basis von Epoxid- oder Polyurethanharz handelt. Außerdem handelt es sich bei den Gemischen CP-1 und CP-2 um Leitlacke, die für die Elektronikindustrie zur Verwendung auf Leiterplatten bestimmt sind. Dies legt hier eine Verwendung von Epoxid nahe.

Bindemittel

Weiterhin sind feste Füllstoffe Bestandteil der ausgehärteten Schicht und beeinflussen die physikalischen Eigenschaften (z.B. elektrische Leitfähigkeit) der hergestellten Strukturen. Die verwendeten Lacksysteme sind mit verschiedenen leitfähigen Kohlenstoff-Partikeln wie z.B. Rußen und Graphit-Plättchen gefüllt. Eine einfache Angabe des resultierenden Leitwertes einer mit Carbon gefüllten Schicht ist komplex, da diese von vielen weiteren Faktoren, wie z.B. Art und Füllgrad der Partikel, Feuchtigkeit oder Druck [238], abhängt. Die Leitfähigkeit für CB (Carbon Black) liegt zum Beispiel im Be-

Füllstoffe

reich von $0,1 \frac{\text{S}}{\text{cm}}$ bis $10^2 \frac{\text{S}}{\text{cm}}$ [238]. In [239] werden verschiedene Einflussfaktoren auf die Leitfähigkeit von kohlenstoffbasierten Füllstoffnetzwerken genauer analysiert. In dieser Arbeit wurde durch geeignete Messungen versucht, die Abhängigkeiten der verwendeten Systeme in Bezug auf Fertigungsprozesse und Anwendungen zu bestimmen. Bedingt durch ihre Herstellung mittels Dispersion, sollen die Carbon-Füllstoffe im Gemisch möglichst homogen verteilt vorliegen. Unmittelbar vor der Applikation ist es notwendig, die Gemische erneut aufzurühren, um Separierungen durch längere Standzeiten zu lösen.

Die Partikelgröße der Carbon Füllstoffe in den Gemischen hat direkten Einfluss auf verschiedene Parameter des Lackes und der ausgehärteten Schicht. So müssen zum Beispiel die jeweiligen Applikationsprozesse an die Partikelgrößen angepasst werden. Dies ist notwendig, um ausreichend Material auftragen zu können, nicht in den Prozessaperturen zurück zu bleiben (Auslöseverhalten) oder diese zu verstopfen. Mit kleineren Partikeln vergrößert sich außerdem die effektive Oberfläche der Füllstoffe. Durch die Kombination von großen und deutlich kleineren Partikeln können sich deutlich mehr leitfähige Pfade zwischen den sich häufiger berührenden Partikelgrenzen ausbilden. Das bewirkt eine höhere elektrische Leitfähigkeit. Auch die Porosität der Schicht nimmt mit kleineren Partikeln zu, was wiederum einen größeren Einfluss von Umgebungsfeuchte zur Folge haben kann. Mit Hilfe von mikroskopischen Vermessungen im Querschliff sowie REM-Aufnahmen wurde daher versucht, den Größenbereich der Partikel in den untersuchten Gemischen genauer zu bestimmen. Da die Füllstoffe nicht in unvermischter Form verfügbar waren, wurden die Aufnahmen an fertig appliziert und ausgehärteten Schichten durchgeführt. In Abbildung 5-12 ist die Partikelgrößenbestimmung von CP-3 Schichten dargestellt.

Partikelgrößen in den Gemischen

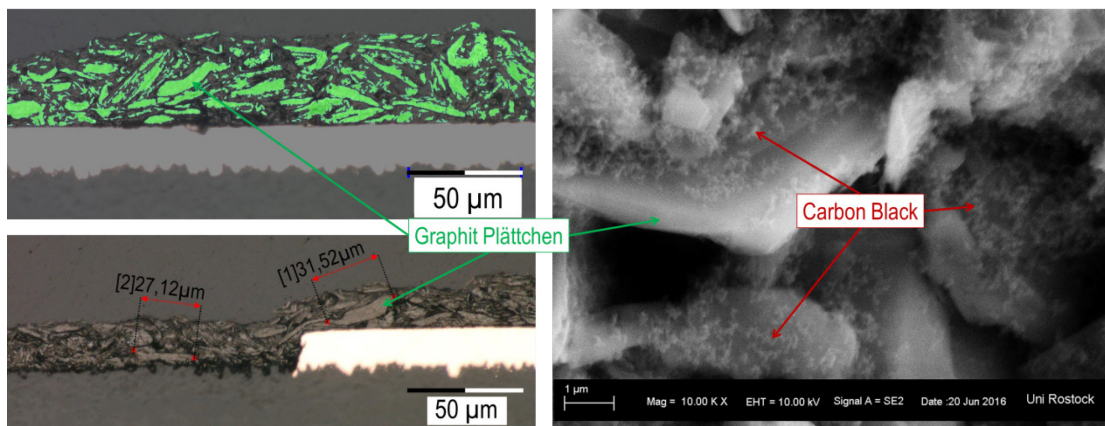


ABBILDUNG 5-12: PARTIKELGRÖßENBESTIMMUNG AN CP-3 MITTELS LICHT- UND RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE

In den lichtmikroskopischen Aufnahmen sind zunächst die Graphit-Plättchen (Flakes) zu erkennen, die irregulär geformt sind und maximal gemessene Durchmesser bis zu 40 µm aufzeigen. Bei höheren Vergrößerungen lassen sich zwischen den Flakes weitere kleinere Partikel erkennen. Deren Größenordnung liegt im Bereich $\ll 1\text{ }\mu\text{m}$. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Leitruße (Carbon Black) handelt. Die Kombination dieser Füllstoffe ist nicht ungewöhnlich und wird so auch zum Beispiel in [240] beschrieben. In [52] ist nachzulesen, dass allein mit Rußen (amorphe Struktur) nicht die erforderliche Packungsdichte zu erzielen ist. Deshalb müssen zusätzlich Graphite mit einer schichtförmigen Struktur mit verwendet werden. Die Untersuchungen der Systeme CP-1, CP-2 und CP-5 (**Anhang D**) haben vergleichbare Ergebnisse bei der Art und Größe der Partikel gezeigt.

Unter dem Lösemittel versteht man ein- oder mehrkomponentige Stoffe, durch die das Bindemittel im Beschichtungsstoff gelöst wird und die sich beim Trocknen bzw. Aushärten verflüchtigen. [47] Je nach Art, Menge und Verdunstungszahl des organischen Lösemittels, bestimmen sich die Trocknungs- und Aushärteparameter. Für bestimmte Harze kann auch Wasser als Lösemittel fungieren (s. CP-3 und CP-5).

Lösemittel

Unter Trocknung versteht man den Übergang von einer flüssigen Lackschicht in einen festen Lackfilm durch die Abgabe von Lösemitteln. Bei rein physikalisch trocknenden Lacken (Lufttrocknung, Wärmetrocknung) ist die Filmbildung damit abgeschlossen. Handelt es sich um wasserverdünnbare Lacke (wie z.B. CP-3), sind diese in den meisten Fällen nach dem Verfließen der Polymerpartikel nicht mehr vom Dispersionsmittel (Wasser) anlösbar. [47] Bei ihnen kann es jedoch leichter zu Benetzungstörungen kommen. Je nach Lösemittelanteil treten bei der Trocknung der Schichten Volumen- und Gewichtsverluste auf. In Abbildung 5-13 ist diese prozentuale Reduktion exemplarisch für CP-3 dargestellt. Die Messungen erfolgten gravimetrisch und durch optische Volumenvermessungen geringer Stoffmengen während des Trocknens. Die Abnahme beträgt für CP-3 etwa 45 % bis 50 %. Bei CP-2 konnten nach einer Härtung im Ofen eine Volumenreduktion um 7 % bis 13 % und ein Gewichtsverlust von 22 % bis 28 % gemessen werden.

Trocknung der
Schichten

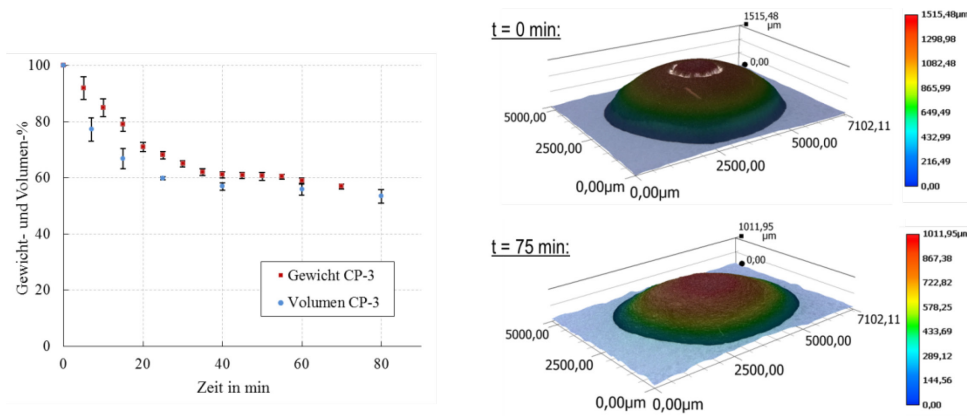


ABBILDUNG 5-13: GEMESSENER VOLUMEN- UND GEWICHTSVERLUST WÄHREND DES TROCKNUNGSVORGANGES VON CP-3 (LINKS) UND BEISPIELAUFNAHMEN DER MIKROSKOPISCHEN VOLUMENVERMESSUNG NACH DER APPLIKATION UND AM ENDE DER TROCKNUNG (RECHTS)

Findet beim Übergang im Lackfilm eine chemische Vernetzung des Bindemittels statt, spricht man von Härtung. Diese kann rein chemisch (z.B. 2-Komponenten-Systeme) oder oxidativ durch Luftsauerstoff induziert werden. Durch erhöhte Temperaturen (z.B. im Ofen) kann dieser Prozess unterstützt werden. Dies ist bei den Systemen CP-1 und CP-2 der Fall, welche für ca. 45 min bei 150 °C trocknen und vernetzen. Messtechnisch abbilden lässt sich dieser Vorgang durch in-situ-Messung des Schichtwiderstandes von applizierten Heizschichten. Für das thermisch härtende System CP-2 und die physikalisch trocknende Schicht CP-3 sind in Abbildung 5-14 die Widerstandsmessungen beim Filmbilden dargestellt. Der Abfall des Schichtwiderstandes ist zum einen auf den Verdunstungsvorgang des Lösemittels, wodurch sich die leitfähigen Partikel auf die geforderten Abstände annähern, und zum anderen auf einen Verdichtungsprozess, welcher stark von Zeit und Größe der thermischen Einwirkung abhängt, zurückzuführen. [52]

Aushärten und Vernetzen

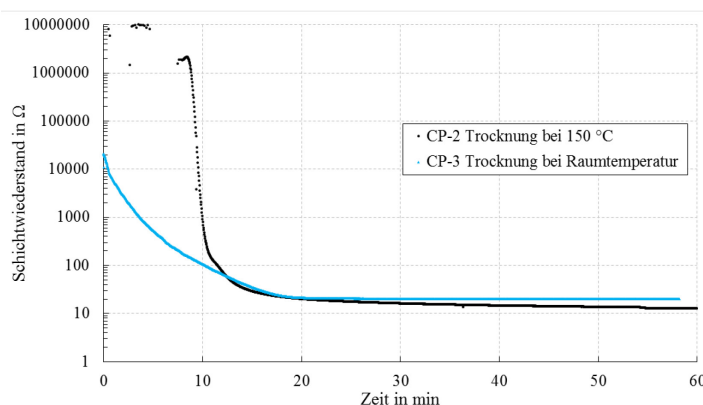


ABBILDUNG 5-14: IN-SITU-WIDERSTANDSMESSUNG WÄHREND DES TROCKNUNGS- BZW. HÄRTUNGSPROZESS VON GEDRUCKTEN SCHICHTEN AUS CP-2 UND CP-3

Bei den aus dem Ofen entnommenen Systemen konnte nach der Abkühlung ein erneuter Anstieg der Schichtwiderstände nachgewiesen werden. Abbildung 5-15 zeigt den

langsamen Anstieg für eine CP-2-Schicht. Es wird vermutet, dass der Vorgang auf eine Wechselwirkung der Luftfeuchtigkeit mit den Carbon-Schichten zurückzuführen ist. Im Folgenden wird darauf noch genauer eingegangen werden.

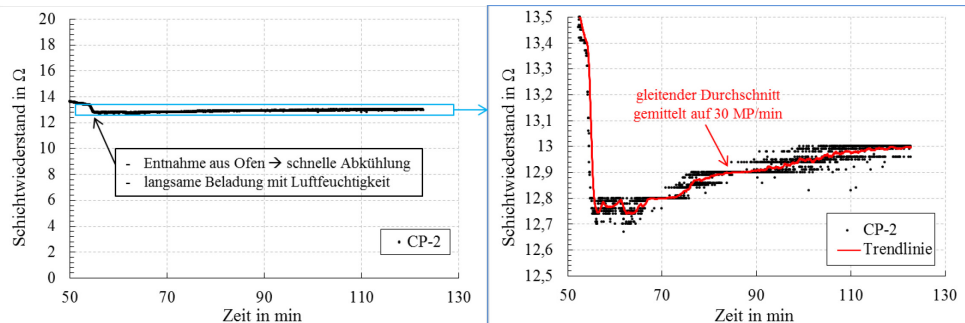


ABBILDUNG 5-15: WIDERSTANDSVORLAUF VON CP-2-SCHICHT NACH DER OFENENTNAHME BEI RAUMKLIMA

Das 2-komponentige System CP-4 soll ca. 90 min bei über 200 °C aushärten. Für den Einsatz auf FR-4-Substraten stellt das bereits eine große Belastung dar. Dieses System wurde daher nur begrenzt untersucht. Für CP-5 wird eine Trocknung bei 125 °C für 30 min und ein anschließender Härtingsprozess bei 225 °C für 12 min empfohlen. Auch hier zeigt sich eine thermische Vorbelastung der Proben. Platinen mit dieser Heizschicht sollten mit einer zusätzlichen Metallisierung (z.B. NiAu) versehen sein, um die Kupferstrukturen vor thermisch induzierter Oxidation zu schützen. Umschmelzversuche mit Lotpasten (hier: SAC305) zeigten auf Proben mit NiAu-Oberfläche, die bei 225 °C für 15 min getempert wurden, ein deutlich besseres Benetzungsverhalten als auf identisch belasteten Proben mit blanker Cu-Oberfläche. Dennoch hat die Vorbelastung eine Verringerung der Benetzungsqualität zwischen getemperten und nicht-getemperten NiAu-Oberflächen gezeigt.

Vorrangig bei oxidativ härtenden Systemen mit höheren Schichtdicken besteht das Risiko einer unzureichenden Durchtrocknung der applizierten Schicht, wobei Lösemittelreste unter ausgetrockneten/vernetzten Bereichen eingeschlossen werden und sich hier ein dauerhafter Gelzustand bildet. [47] Dies kann zu negativen Beeinflussungen der Endigenschaften (z.B. elektrische Leitfähigkeit, Haftfestigkeit) führen. In [47] werden eine Reihe weiterer möglicher Fehlstellen im Beschichtungsfilm sowie deren Ursachen vorgestellt. Häufig hängen diese mit Fehlern im Applikations- und Trocknungsprozess zusammen. In Abbildung 5-16 sind detektierte Fehlstellen dargestellt, die im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen an einzelnen Proben auftraten.

Fehlstellen bei der Filmbildung

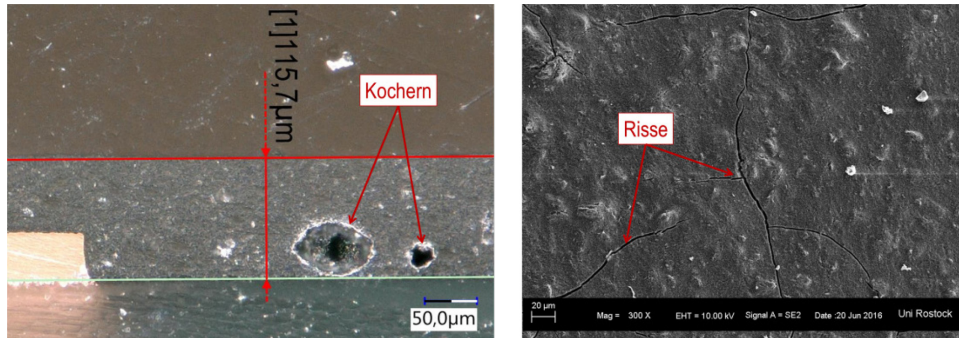


ABBILDUNG 5-16: VEREINZELT BEOBACHTETE FEHLSTELLEN; KOCHERBILDUNG EINER DICKEREN CP-1-LACKSCHICHT (LINKS); RISSBILDUNG IN AUSGEHÄRTETER LACKSCHICHT EINE LOW-COST LEITLACKES (RECHTS)

An einer zu dick ($\sim 115 \mu\text{m}$) applizierten CP-1-Schicht kam es durch Lösemitelein-schlüsse zur Kocherbildung^{xiii}, welche nach [47] vornehmlich bei der Ofenhärtung auf-tritt. Bei Vergleichsuntersuchungen mit einem ‚Low-Cost‘-Leitlack [241] trat des Weite-ren Rissbildung in der ausgehärteten Schicht auf. Ursache sind nach [47] ebenfalls zu dicke Schichten oder ein ungenügend elastisches Lacksystem. Diese Form der Riss-bildung ist für die hier angestrebten Heizschichten als besonders kritisch zu bewerten, wurde jedoch bei den anderen Schichtsystemen nicht identifiziert.

Mittels REM-Untersuchungen wurde die Oberflächenbeschaffenheit der hergestellten Schichten bewertet. Bei allen Carbon-Gemischen lassen sich glattere sowie körnige Bereiche erkennen, welche gleichmäßig über die Oberfläche verteilt sind. Glattere Be-reiche deuten auf das vernetzte Bindemittel und körnigere auf die verteilten Ruß- und Graphitpartikel hin.

Oberflächenbeschaf-fenheit der Schichten

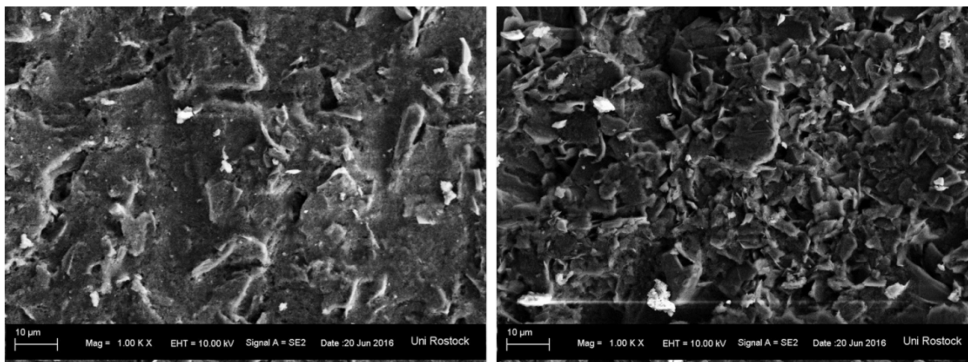


ABBILDUNG 5-17: REM-AUFNAHME DER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT APPLIZIERTER CARBON-SCHICHTEN; EXEMPLARISCH FÜR CP-2 (LINKS) UND CP-3 (RECHTS)

Zusätzlich wurden EDX-Messungen der Schichten durchgeführt, um die chemischen Stoffanteile in den Schichten zu bestimmen. In **Anhang E** sind die Messungen von CP-2 und CP-3 dargestellt. Der dominierende Stoff ist erwartungsgemäß Kohlenstoff, ge-

EDX-Messungen

^{xiii} Kocher: Begriff aus der Lack- und Farbindustrie; bezeichnet eine blasenähnliche Oberflächenstörung im Lackfilm

folgt von Sauerstoff. Die Anteile von Kohlenstoff und Sauerstoff sind in den verschiedenen Schichten ähnlich und entsprechen den Ergebnissen von Messungen an einem vergleichbaren System in [143]. Auch hier wurden Kleinstmengen weiterer Elemente detektiert, welche teilweise auf Verunreinigungen und Stoffe aus dem FR-4-Substrat (z.B. Al, SiO) zurückzuführen sind. Geringe Mengen von Schwefel können Bestandteil der Carbon (Ruß) -Partikel sein. [242]

5.3 APPLIKATIONSMÖGLICHKEITEN DER AUSGEWÄHLTEN HEIZMATERIALIEN

Im folgenden Abschnitt sollen die untersuchten Möglichkeiten zur Applikation der unterschiedlichen Heizschicht-Materialien auf die Leiterplatte vorgestellt werden. Im Vordergrund stehen dabei vor allem die Carbon-Gemische. Für eine spätere effiziente Anwendung ist ein reproduzierbares Auftragsergebnis notwendig. Der Einsatz von Applikationsprozessen, basierend auf bestehender Anlagentechnik der Leiterplattenfertigung, soll hierbei bewertet werden und ist dem Einsatz neuer Technologien und Prozessstechniken vorzuziehen. Unmittelbar vor der Applikation ist eine Reinigung und Trocknung der verwendeten Leiterplatten-Substratmaterialien erforderlich, um eine möglichst gute Haftung der Schicht zu erzielen und Benetzungsfehler zu vermeiden. Metallische Bereiche können zudem chemisch (Mikroätzen) oder mechanisch (Bürsten) vorbehandelt werden, um auch hier die Hafteigenschaften zu verbessern und um einen möglichst niedrigen Kontaktwiderstand zur Heizschicht zu erzielen.

Allgemeines

5.3.1 APPLIKATION MITTELS STREICHEN, SPRÜHEN UND SCHLEUDERN

Die manuellen Applikationsverfahren Aufstreichen, Aufrollen und Aufsprühen sowie das Aufschleudern mittels Rotationsbeschichtung, sollen in diesem Abschnitt kurz vorgestellt werden. Diese Varianten werden aber nicht als favorisierte Auftragsmethoden angesehen. Es wird daher nur deren generelle Anwendbarkeit sowie der Einfluss auf die erzeugten Schichten betrachtet.

Alternative Applikationsverfahren

Auf Grund der vergleichsweise niedrigen Viskosität von CP-3 mit $3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ bis $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ wurde der Lack vorzugsweise für diese manuellen Applikationsvarianten ausgewählt. Das Lacksystem findet unter anderem Anwendung als elektrisch beheizbare Wandfarbe zur Raumklimatisierung und wird hierfür mit herkömmlichen Farbbrollen appliziert.

Lacksystem für Applikationsversuche

Zunächst wurde das manuelle Aufstreichen des Carbon-Lackgemisches mit einem herkömmlichen Pinsel versucht. Nicht zu bestreichende Bereiche können mit Klebebändern geschützt werden. Ein vollflächiger Schichtauftrag ist damit durchführbar, er-

Manuelles Aufstreichen

füllt aber erwartungsgemäß nicht die Anforderung an eine homogene Schichtdicke. In Abbildung 5-18 ist ein Applikationsergebnis sowie die daraus resultierende Erwärmungscharakteristik mit lokalen Hotspots in dünneren Schichtteilen zu erkennen. Die elektrische Ankontaktierung erfolgt hier durch Überstreichen der Schicht auf zuvor applizierten Kupfer-Klebebändern.

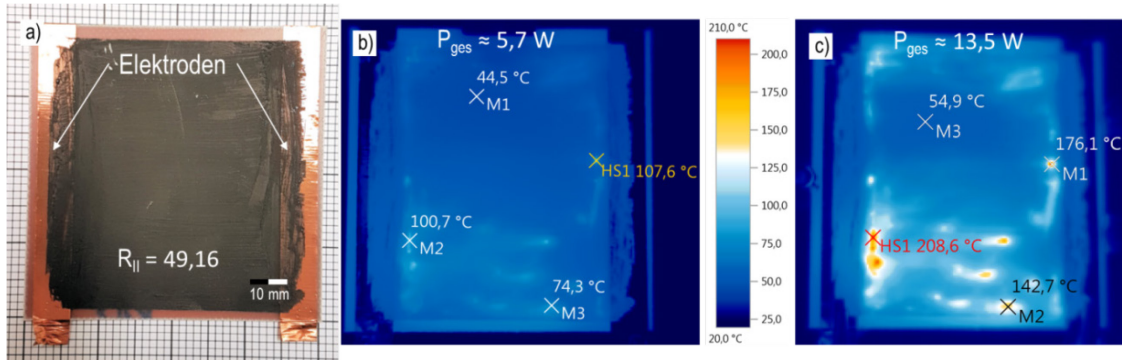


ABBILDUNG 5-18: CARBON-HEIZSCHICHT APPLIKATION MITTELS MANUELLEN AUFSTREICHENS VON CP-3; A) BEISPIELPROBE MIT ÜBERSTRICHENEN KONTAKTBÄNDERN; B) IR-AUFNAHME BEIM HEIZEN MIT 15,5 V UND 0,34 A; IR-AUFNAHME BEIM HEIZEN MIT 25,7 V UND 0,52 A

Beim Beaufschlagen der aufgestrichenen Schicht ($A = 41,6 \text{ cm}^2$) mit ca. 13,5 W ergeben sich in vereinzelten Bereichen Temperaturen über 200 °C, wohingegen der Großteil der Schicht nur um die 60 °C aufweist. Hieran lässt sich bereits die vergleichsweise schlechte Wärmeleitfähigkeit ($\sim 1,5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$) der Carbon-Schichten erkennen, die die Bildung von Hotspots begünstigt. Bei höheren Leistungen würde dies zu thermischen Schädigungen der Heizschicht und des Substrates führen. Die an den Proben gemessenen Rauigkeiten der Heizschicht variieren. Sie liegen für R_a um die 5 μm und für R_z zwischen 22 μm und 33 μm .

In Anlehnung an die Applikation beheizbarer Wandfarben wurde auch in diesem Fall der Schichtauftrag mittels kleineren Farbrollen ($l = 80 \text{ mm}$) untersucht. Dafür wurden zunächst Proben mit dem niederviskoserem CP-3-Lacksystem erstellt. Die Probengeometrien entsprachen der Länge der Farbrolle, um keinen Versatz durch erneutes Ansetzen der Rolle zu erzeugen. In Abbildung 5-19 sind einige IR-Aufnahmen von auf diesem Wege erzeugten Heizschichten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Schichtauftrag zwar lokal gleichmäßiger ist als beim Aufstreichen, sich aber deutliche Temperaturunterschiede über größere Bereiche der gesamten Schicht ergeben. Ansatzweise lässt sich in den Aufnahmen auch ein, durch die Rolle eingepprägtes, Profilmuster in der Schicht erkennen.

Manuelles Aufrollen

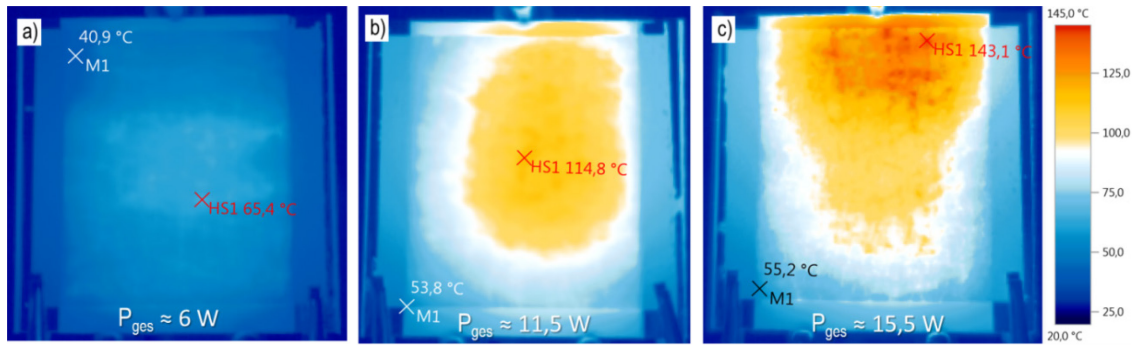


ABBILDUNG 5-19: CARBON-HEIZSCHICHT (CP-3) APPLIKATION MITTELS MANUELLEN AUFROLLENS; IR-AUFNAHMEN BEIM HEIZEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN VERLUSTLEISTUNGEN

Ein etwas gleichmäßigeres Applikationsergebnis wurde mit der hochviskoserer CP-3-Paste erzielt. Dies lässt sich zum Beispiel an der IR-Aufnahme einer solchen Probe in Abbildung 5-20 erkennen. Aus den lokalen Temperaturprofilen ist ein annähernd homogener Temperaturverlauf über einen Großteil der Heizschichtlänge abzulesen. In Verbindung mit dem ungleichmäßigeren Temperaturverlauf über die Breite der Heizschicht kann dies auf den Einfluss der Rollrichtung und eine ungleichmäßige Farbübertragung entlang des Abrollens über dem Substrat zurückgeführt werden.

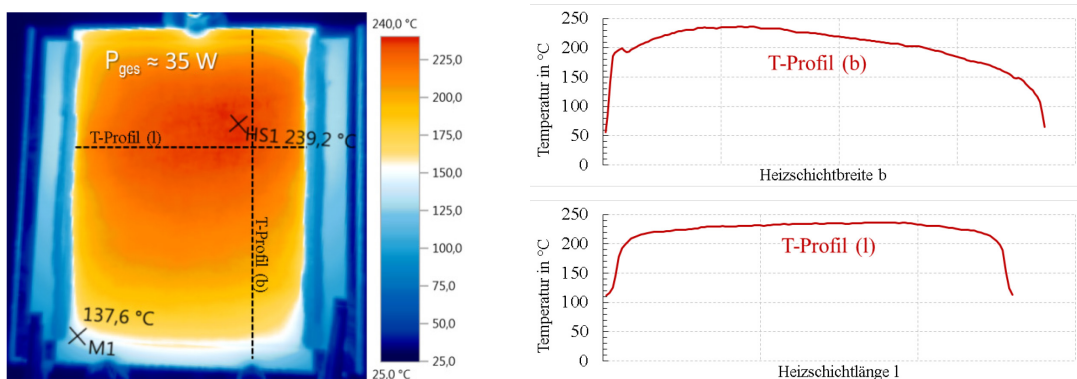


ABBILDUNG 5-20: CARBON-HEIZSCHICHT (CP-2) APPLIKATION MIT MANUELLEM AUFROLLEN; IR-AUFNAHME ($\epsilon = 0,86$) BEIM HEIZEN MIT 19,7 V UND 1,8 A (LINKS); EXEMPLARISCHE LOCALE TEMPERATURPROFILE ÜBER BREITE BZW. LÄNGE DER HEIZSCHICHT (RECHTS)

Insgesamt kann die Schichtapplikation mit dem manuellen Aufrollen sehr schnell durchgeführt werden. Dennoch ergeben sich bereichsweise Inhomogenitäten in den Schichtdicken, die bei Heizversuchen zu lokalen Überhitzungen sowie Schädigungen durch Verbrennungen und Delaminationen in diesen Bereichen geführt haben.

Bei der Rotationsbeschichtung (engl.: spincoating) handelt es sich um ein Applikationsverfahren für dünne Schichten, bei dem ein Fluid auf ein sich drehendes Substrat dosiert wird und durch Zentrifugalkräfte auf diesem verteilt wird. Anwendung findet das Verfahren hauptsächlich in der Halbleiterindustrie zur Applikation von Resistbeschich-

Schichtauftrag mittels Aufschleudern

tungen auf Wafern. [58] Die erzeugte Schichtdicke ist hierbei von der Viskosität des Fluides, der Drehgeschwindigkeit der Schleuder sowie der Prozessdauer abhängig. Genauer werden diese Abhängigkeiten in [243] anhand mathematischer Modelle für die Bestimmung von Prozessparametern und Schichteigenschaften vorgestellt. Für die Untersuchungen zur Applikation von Heizgemischen auf Leiterplatten sind entsprechende FR-4-Proben (50 mm x 50 mm) nach dem in Abbildung 5-21 dargestellten Ablauf hergestellt worden. Die Elektroden zur Ankontaktierung der Schichten wurden im Anschluss an den Prozess aufgebracht, um die Fluidausbreitung nicht zu stören.

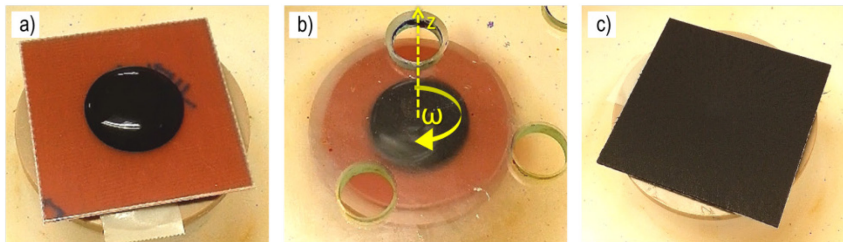


ABBILDUNG 5-21: PRINZIPIELLER ABLAUF DER APPLIKATION MITTELS ROTATIONS BESCHICHTUNG VON CARBON-GEMISCHEN (HIER CP-3) AUF FR-4-PROBEN; A) DOSIERTE LACKMENGE; B) ROTATION DER PROBE; C) PROBE MIT APPLIZIERTER SCHICHT

Bei den Versuchen wurde mit Rotationsgeschwindigkeiten von 1000 U/min bis 6000 U/min für jeweils 50 s gearbeitet. Dies wird in [244] auch für industrielle Beschichtungen empfohlen, um eine hohe Gleichmäßigkeit der Schicht zu gewährleisten. Die Versuche haben gezeigt, dass für eine vollständige Prozessierung durch Aufschleudern nur das niederviskose CP-3-System in Frage kommt. In dem Diagramm von Abbildung 5-22 ist zu erkennen, dass der Flächenwiderstand der aufgeschleuderten CP-3-Schichten mit steigender Rotationsgeschwindigkeit ansteigt. Dies entspricht der theoretischen Erwartung, nach der die Schichtdicke mit größer werdenden Drehzahlen abnimmt. Bei CP-2 konnte nur mit dem Höchstwert von 6000 U/min ein vollflächiger Schichtauftrag erzeugt werden.

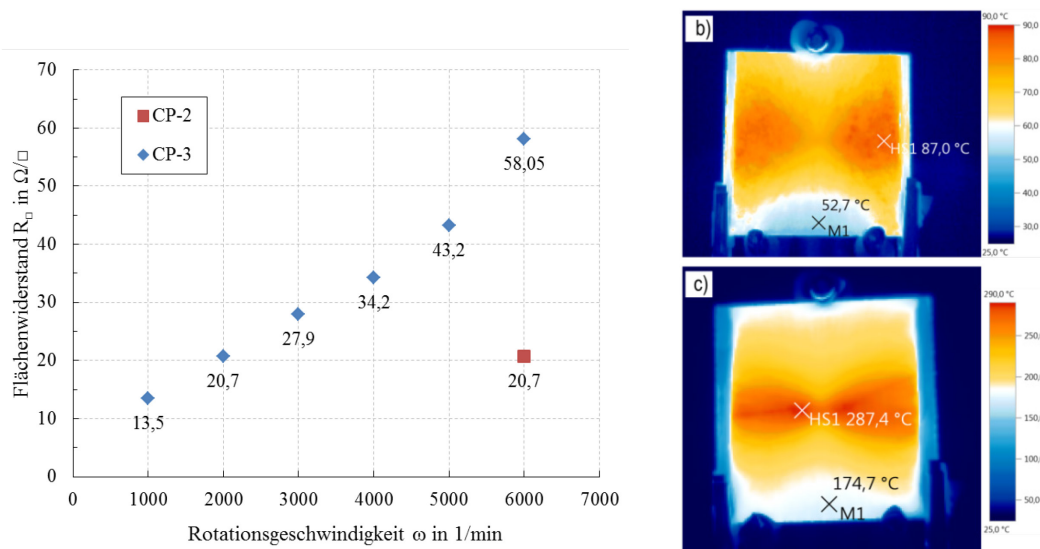


ABBILDUNG 5-22: SPIN-COATING VON CARBONLACK: A) GEMESSENE FLÄCHENWIDERSTÄNDE IN ABH. DER ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT ($T = 50$ s); B) IR-MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER CP-3-PROBE (6000 1/MIN ÜBER 50 s); C) IR-MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER CP-2-PROBE (6000 1/MIN ÜBER 50 s).

Bei aktivem Heizen der aufgeschleuderten Schichten wird eine ungleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Schicht deutlich. In den IR-Aufnahmen (Abbildung 5-22) ist zu erkennen, dass ausgehend von der Rotationsachse eine radialsymmetrische Änderung der elektrischen Leitfähigkeit vorliegt. Beim Stromfluss zwischen den beiden Elektroden äußert sich dies in dem zu erkennenden IR-Muster. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies auf die unterschiedlich großen Partikel innerhalb der flüssigen Lackschicht zurückzuführen ist. Bei der Rotation entstehen unterschiedlich große Zentrifugalkräfte an Graphit-Plättchen, Ruß-Aggregaten und einzelnen Ruß-Teilchen. Dies kann beim Prozessieren zu Separationen zwischen den Partikelgrößen innerhalb der Schicht führen. Dieser Einfluss war bei allen aufgeschleuderten Schichten zu beobachten. Des Weiteren wird die Eignung von FR-4-Basismaterialien für die Rotationsbeschichtung als ungenügend angesehen.

Für die Versuche zum manuellen Aufsprühen wurde ein einfaches, gasgetriebenes Airbrushsystem mit Zweistoffdüse verwendet. Ähnliche Systeme werden im Bereich der organischen Elektronik zum Beispiel zur Herstellung von Schichten in der Photovoltaik [245] oder zur Herstellung organischer Halbleiterschichten [246] genutzt. Bei dem hier verwendeten System treffen das zu zerstäubende Gemisch und das Gas knapp außerhalb der Düse aufeinander. Als Folge wird der austretende Lack, in Abhängigkeit vom Gasdruck, fein zerstäubt und mit hoher Geschwindigkeit auf das Substrat getrieben. Es wurde sich auch bei diesen Versuchen auf CP-3 beschränkt, da dessen Ausgangsviskosität am ehesten für die Zerstäubung geeignet ist. Vorversuche haben gezeigt, dass das Sprühergebnis durch eine weitere Verdünnung mit 10 ew .-% Wasser verbessert werden konnte. Das Carbon-Gemisch wurde so auf

Manuelles
Aufsprühen
von CP-3

FR-4-Substrate mit Kupferelektroden appliziert. Es wurde im Kreuzgang gesprüht, um eine möglichst gleichmäßige Schichtdickenverteilung zu erzielen. Die Anzahl der Sprühdurchgänge wurde variiert, um verschiedene Schichtdicken zu erzeugen. Ein Ergebnis der Versuche zeigt Abbildung 5-23. Die Heizfläche (60 mm x 58 mm) kann durch Abkleben der entsprechenden Randbereiche gebildet werden. In Abbildung 5-23 sind die Ergebnisse der Aufsprühversuche dargestellt. Erwartungsgemäß lässt sich mit einem manuellen Auftrag keine homogene und reproduzierbare Schicht herstellen. Dennoch zeigt der Versuch, dass sich Schichtwiderstände innerhalb der benötigten Größenordnung aufsprühen lassen. Eine weitere Untersuchung von Sprühtechnologien soll in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Es wird aber erwartet, dass durch den Einsatz von automatisierten Sprührobotern, wie sie in [142] verwendet werden, die Schichtqualität verbessert werden kann.

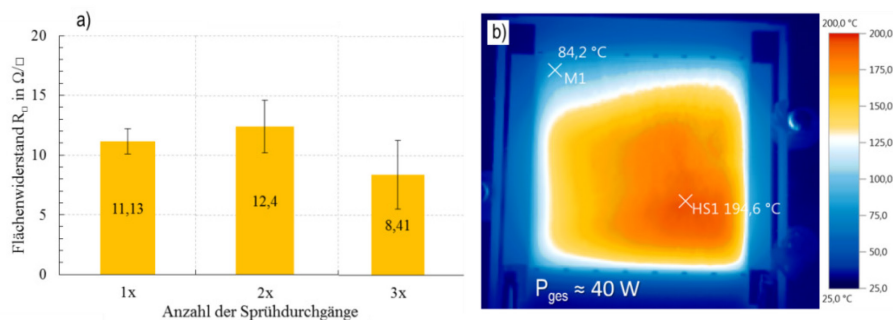


ABBILDUNG 5-23: AUFSPRÜHEN VON CP-3; A) GEMESSENE FLÄCHENWIDERSTÄNDE IN ABH. DER SPRÜHDURCHGÄNGE (MANUELL; KREUZGANG); B) IR-MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG EINER CP-3-PROBE (1X SPRÜHDURCHGANG).

5.3.2 HEIZSCHICHT APPLIKATION MITTELS DRUCKTECHNOLOGIEN

Die Druckversuche zur Schichtapplikation der verschiedenen Carbon-Gemische wurden in zwei Versuchsinstanzen durchgeführt. Zunächst erfolgte mittels manuellen Siebdruckversuchen bzw. halbautomatischen Schablonendrucken die Eingrenzung der generellen Prozesseignung sowie der verschiedenen Prozessparameter. In zweiter Instanz wurden die Prozesse auf einen industrienahen, vollautomatischen Sieb- und Schablonendrucker übertragen und weiter abgestimmt. Insgesamt werden mit den Druckverfahren und insbesondere mit dem automatisierten Prozess bessere Applikationsergebnisse erwartet als mit den bereits vorgestellten manuellen Applikationsprozessen. Die Grundlagen der hier verwendeten Drucktechnologien sind bereits in Abschnitt 2.2.2.2 dargelegt.

Neben dem großflächigen Drucken ohne strukturierte Masken wurde für diese Versuche zudem ein spezielles Drucktestlayout entworfen, welches sowohl für Siebe als

Versuchsreihenfolge

Drucktestlayout

auch für Schablonen verwendet wurde. Das Layout und eine bedruckte Probe sind in Abbildung 5-24 dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Testbereiche auf dem Layout befindet sich in **Anhang F**. Die meisten der einzelnen Testsegmente sind durch Leiterzüge auf eine gemeinsame elektrische Masse geführt. Die Gegenelektrode jedes Heizsegmentes hat einen Messpunkt zur elektrischen Kontaktierung. Somit kann leicht eine elektrische Quantifizierung der erzeugten Flächenwiderstände erfolgen.

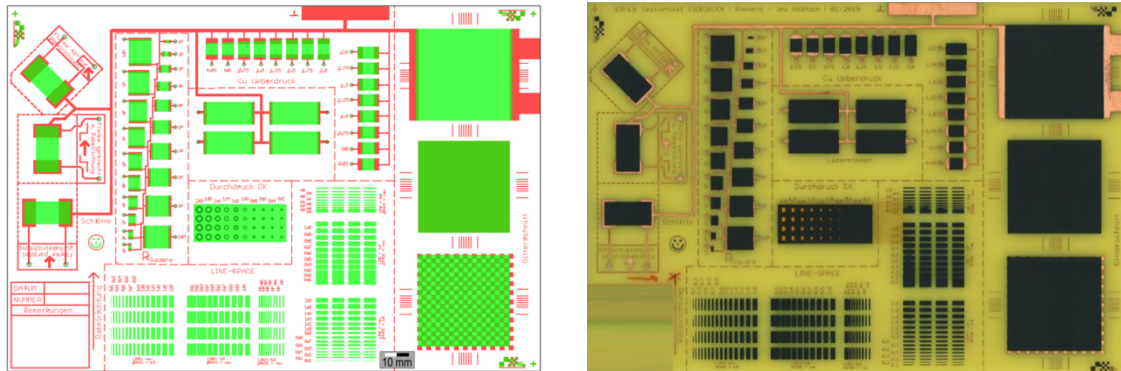


ABBILDUNG 5-24: TESTLAYOUT (233 MM X 160 MM) FÜR AUTOMATISIERTE DRUCKVERSUCHE VON CARBON-GEMISCHEN MIT SIEBEN UND SCHABLONEN; CAD-DATEN MIT SIEB/SCHABLONEN LAYER (GRÜN) (LINKS); BEDRUCKTE PLATINE MIT CARBON-HEIZSCHICHTEN (RECHTS)

5.3.2.1 SIEBDRUCK VON CARBON-GEMISCHEN

In Vorversuchen erfolgte zunächst die großflächige Applikation mit unstrukturierten Sieben. Die nicht zu bedruckenden Bereiche wurden mit Klebebändern geschützt, die nach dem Druckprozess (und vor dem Aushärten der Schicht) wieder entfernt wurden. Auf diese Weise lässt sich zudem eine scharfe Flanke erzeugen, welche für Schichtdickenmessungen durch Profilometer geeignet ist.

manuelle Siebdrucke

Für die manuellen Druckversuche standen verschiedene lose Gewebe und bespannte Siebe ohne Strukturierung zur Verfügung. Es werden die Druckergebnisse für drei unterschiedliche Siebe dargelegt. Da nicht für alle Siebe Herstellerdaten vorlagen, wurden die Gewebe zunächst mittels Mikroskopaufnahmen vermessen, um eine theoretische Abschätzung des erwarteten Schichtauftrages zu ermöglichen. Die gemessenen Siebdaten finden sich in **Anhang G**. Bei den Sieben mit den Mesh-Zahlen 85 und 137 handelt es sich um im Labor gespannte Siebgewebe. Das Mesh-200-Sieb ist industriell angefertigt worden.

Verwendete Siebe

Bei den Druckversuchen wurden Handrakel aus Gummi (~75 Shore) und Edelstahl ($d = 200 \mu\text{m}$) verwendet. Die besseren Druckergebnisse wurden mit dem Gummirakel erreicht. Die maximale Heizschichtbreite wurde etwas schmaler als die Rakelbreite

Druckergebnisse

gewählt, um ein mehrmaliges Ansetzen des Rakels zu vermeiden. Mittels mehrfacher Profilmessung wurden die hergestellten Schichtdicken an mehreren Proben mit den ausgehärteten Carbon-Gemischen CP-2 und CP-3 bestimmt. Die gemittelten Messergebnisse für drei unterschiedliche Siebe sind in Abbildung 5-25 dargestellt.

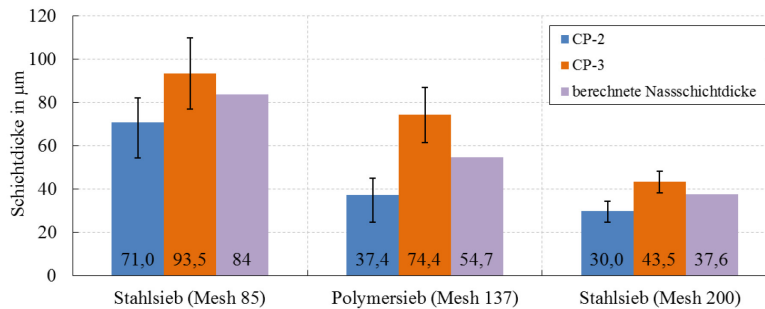


ABBILDUNG 5-25: GEMESSENE SCHICHTDICKEN BEI DER APPLIKATION MITTELN MANUELLEM SIEBDRUCK VON CP-2 UND CP-3 MIT VERSCHIEDENEN SIEBEN

In der Grafik zeigt sich zunächst die Erwartung bestätigt, nach der Siebe mit größerer Mesh-Zahl geringere Schichtdicken produzieren. Es fällt auf, dass vor allem die Schichtdicke des ausgehärteten CP-3 im Mittel über der theoretischen Nassschichtdicke des jeweiligen Siebes liegt. Da die Carbon-Gemische beim Aushärten einem Volumenschwund unterliegen (s. Abschnitt 5.2.3), lässt sich vermuten, dass hier deutlich mehr Material aufgetragen wurde. Die Schichtdicken des hochviskoser Materials CP-2 entsprechen durch den zuvor bestimmten Volumenschwund von ca. 10 % eher den Erwartungen. Die beiden Labor-Siebe (Mesh 85 & Mesh 137) weisen im Vergleich zum industriell gefertigten Sieb (Mesh 200) eine deutlich höhere Standardabweichung auf. Für diese Siebe wurde keine Rahmenfixierung verwendet. Deshalb war kein reproduzierbarer Absprung gewährleistet. Für das Mesh-200-Sieb konnte dies durch eine verstellbare Rahmenfixierung verbessert werden.

Die Oberflächenbeschaffenheit der gedruckten Heizschichten wurde sowohl optisch als auch durch Profilmessungen bewertet. In Abbildung 5-26 sind Beispiele für optisch vermessene 3D-Profile von manuell siebgedruckten Heizschichten (CP-2 und CP-3) zu erkennen. Bei den Untersuchungen konnte häufig ein durch das Sieb eingprägtes Muster gefunden werden, welches vor allem beim hochviskoser CP-2 zu erkennen ist. Die mit CP-3 gedruckten Strukturen neigen durch die niedrigere Viskosität teilweise zum Verlaufen. Dennoch weisen die CP-3-Schichten größere Rautiefen auf. Dies wird teilweise auf die Beobachtung zurückgeführt, dass hier vermehrt Material beim Druck in den Siebmaschen zurückbleibt und nicht appliziert wird. Die mittels Profilometer ge-

Oberflächenbeschaffenheit der Schichten

messenen Rauigkeiten betragen bei der Verwendung eines Mesh-200-Siebes für CP-2 $R_a \approx 1,7 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \approx 9,8 \mu\text{m}$ und für CP-3 $R_a \approx 2,1 \mu\text{m}$ bzw. $R_z \approx 11,6 \mu\text{m}$.

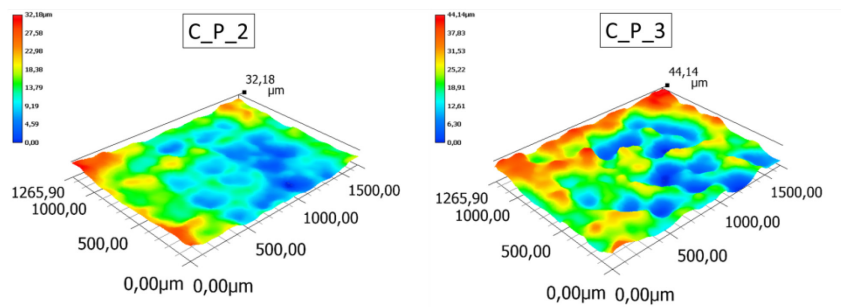


ABBILDUNG 5-26: OPTISCH VERMESSENES 3D-PROFIL VON MANUELL SIEBGEDRUCKTEN CARBON-GEMISCHEN

Ein verstärktes Auftreten von Fehlstellen, die auf den manuellen Druckprozess zurückgeführt werden, konnte bei den mit CP-3 hergestellten Proben beobachtet werden. Einige Beispiele dieser Abweichungen sind im **Anhang H** dargestellt und konzentrieren sich auf die Randbereiche der gedruckten Schichten.

Fehlstellen

Durch die Regelmäßigkeit des Musters über der Heizfläche ist es dennoch möglich, eine Erwärmung über die gesamte Fläche zu erzielen. In Abbildung 5-27 ist exemplarisch die Temperaturverteilung beim elektrischen Heizen von siebgedruckten Schichten aus CP-2 bzw. CP-3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für eine möglichst gleichmäßige Erwärmung die CP-2-Schichten den CP-3-Proben vorzuziehen sind. Qualitative Schwankungen beim manuellen Siebdruck führen beim niederviskoserem Gemisch häufig zu größeren Ungleichmäßigkeiten innerhalb einer Schicht, welche wiederum Hotspots bzw. heißere Bereiche zur Folge haben. Die Temperaturverteilung von CP-2 ist hingegen homogener, und damit zeigt sich eine deutliche Verbesserung gegenüber den vorherigen Applikationsuntersuchungen. Dieses Verhalten ist charakteristisch für einen Großteil der hier erzeugten Proben.

Heizen mit manuell
siebgedruckten
Schichten

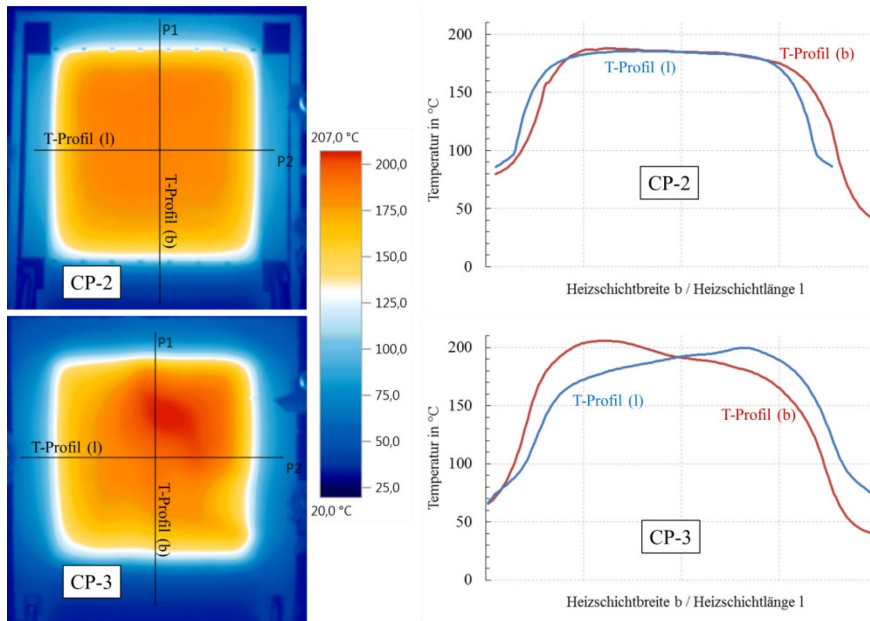


ABBILDUNG 5-27: EXEMPLARISCHE TEMPERATURVERTEILUNG BEIM HEIZEN VON MANUELL SIEBGEDRUCKTEN HEIZSCHICHTEN; IR-AUFNAHME UND T-PROFILE VON HEIZSCHICHT CP-2 (OBEN); IR-AUFNAHME (VON FR-4 RÜCKSEITE BETRACHTET) UND T-PROFILE VON HEIZSCHICHT CP-3 (UNTEN)

Der manuelle Siebdruck wird als das geeignetste Applikationsverfahren für die Herstellung von Heizschichtproben im Labormaßstab angesehen. Am reproduzierbarsten gelang mit diesem die Applikation von Schichten aus CP-2 und CP-1, welche ein sehr ähnliches Druckverhalten aufweisen. Für weitere Untersuchungen bei denen keine homogene Temperaturverteilung gefordert war (z.B. Einbettversuche), wurde auch die Applikation von Proben mit CP-3 als genügend angesehen. Schwierigkeiten bei dieser Applikationsweise lagen im aufwendigen Vor- und Nachbearbeiten der Proben in Kombination mit geringen Topfzeiten der Gemische auf den Sieben und in der Verunreinigung der Siebe durch die Carbon-Gemische. (mehr dazu im folgenden Abschnitt)

Bewertung des
manuellen
Siebdruckes

Im späteren Verlauf dieser Arbeit konnten die Siebdruckuntersuchungen auf einen industriellen Druckautomaten ausgeweitet werden. Hierbei sollte mit strukturierten Sieben gearbeitet werden, welche auch für eine spätere Anwendung der Heizschichten auf Leiterplatte genutzt werden müssen. Im automatisierten Siebdrucker ist es möglich, eine Reihe von gedruckten Proben nacheinander herzustellen. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die wasserbasierten Carbon-Gemische CP-3 und CP-5 relativ schnell austrocknen. Dadurch kann es bereits nach 2 bis 3 Drucken zu ersten Fehlstellen im Druckbild kommen. Diese Eigenschaft lässt sich in vergleichenden Viskositätsmessung der wasserbasierten Gemische und CP-2 erkennen. Das Diagramm in Abbildung 5-28 zeigt die im Platte-zu-Platte-Verfahren gemessenen Viskositätswerte bei einer Scherrate von $10 \frac{1}{s}$. Nach der Initialwertbestimmung wurde die Messung der Probe alle 5 min wiederholt. Die wasserbasierten Carbon-Gemische zeigen zunächst eine Viskositäts-erhöhung infolge der Austrocknung. Anschließend sinken die gemessenen Werte wieder, da es zu Separationerscheinungen und verminderter Kohäsion innerhalb der Materialmenge kommt. Im Vergleich dazu zeigt CP-2 ein nahezu konstantes Verhalten.

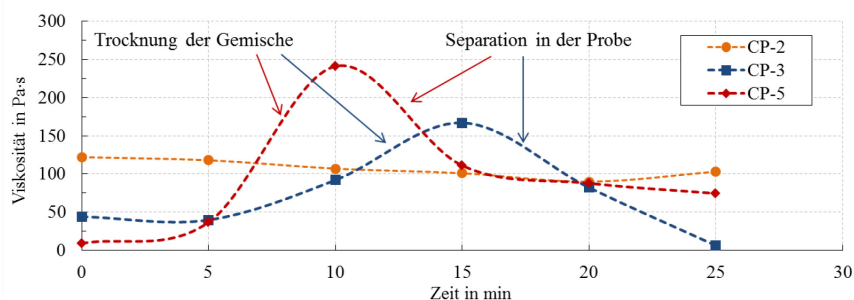


ABBILDUNG 5-28: GEMESSENE VISKOSITÄTEN VERSCHIEDENER CARBON-GEMISCHE BEI EINER SCHERRATE VON $10 \frac{1}{s}$ MIT EINER PLATTE/PLATTE-ANORDNUNG

Beim technischen Siebdruck und vor allem im Bereich der Elektroniktechnologie ist der Einsatz wasserbasierter Beschichtungsstoffe eher unüblich. Daher sind die hier verwendeten Fotoemulsionen häufig nicht wasserbeständig. Nach dem Beginn des Trocknungsprozesses der Beschichtungsstoffe mussten die Siebe gereinigt werden, um wieder bessere Druckergebnisse erzielen zu können. Da die Reinigung der wasserbasierten Gemische auch mit Wasser erfolgt, kam es zum An- bzw. Ablösen von Teilen der Siebemulsionen. Denkbar ist auch, dass diese bereits beim Druckvorgang Wasser aufgenommen haben. Dadurch konnten die verwendeten Testsiebe entweder nicht vollständig gereinigt werden oder die Standzeiten der Siebe wurden stark verringert. In Abbildung 5-29 sind einige häufige Verunreinigungen dargestellt, die bereits nach wenigen Siebdrucken im Gewebe zurückbleiben und somit das Druckbild stören.

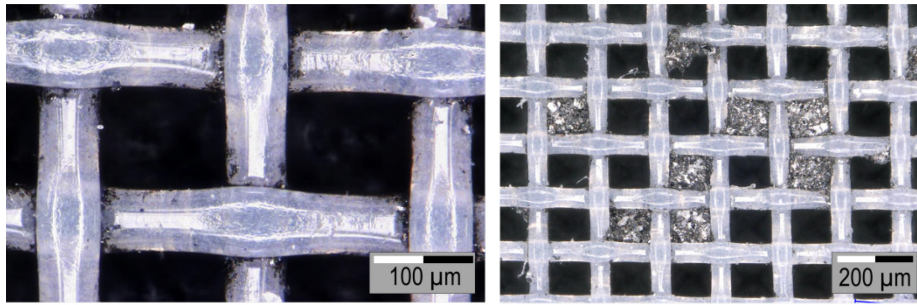


ABBILDUNG 5-29: SIEBGEWEBE MIT MATERIALRESTEN DER CARBON-GEMISCHE; INNERHALB DER DRAHTÜBERLAPPUNGEN (LINKS); INNERHALB DER MASCHEN (RECHTS)

5.3.2.2 SCHABLONENDRUCK VON CARBON-GEMISCHEN

Neben dem Siebdruck wurde auch der Metallschablonendruck als Applikationsvariante für die hier untersuchten Heizschichtgemische erprobt. Der Vorteil einer reinen Metallschablone liegt in der einfacheren manuellen Reinigung gegenüber einem engmaschigen Sieb. Sofern die Schablone nicht in einen Siebrahmen verklebt wurde, fällt die Wahl des Reinigungsmediums leichter, da keine Rücksicht auf Kleber- oder Emulsionsbeständigkeiten genommen werden muss.

Schablonendruck

Bei der Applikation von Lotpasten hat sich der Schablonendruck gegenüber dem Siebdruck durchgesetzt. Begründet ist das in dessen Möglichkeit, noch kleinere Druckauflösungen mit gedruckten Depots zu erreichen, als dies mit Sieben möglich ist. Für größere Öffnungs-Geometrien in der Schablone besteht allerdings die Möglichkeit, dass ein deformierbarer Rakel beim Drucken in die Öffnung ragt. Dabei würde vor allem in der Depotmitte von großen Öffnungen weniger (oder gar kein) Material appliziert werden. Bei Lotpastenschablonen werden daher Haltestege oder andere Padmodifikationen an größeren Öffnungen vorgenommen, um dies zu verhindern. Alternativ können steifere Rakel verwendet werden, sofern keine Stufenschablone [100] genutzt werden soll. Bei den hier zu applizierenden Heizschichten handelt es sich teilweise um sehr viel größere Schablonenöffnungen, als man sie standardmäßig beim Lotpastendruck findet. Durch die Anforderung an eine durchgehend leitfähige, homogene Schicht ist das Einbringen von Rakelstützstellen innerhalb der Struktur keine Option. Bei den automatischen Schablonendrucken wurde daher ein 5 mm dicker Radenrakel verwendet. Nach der Berührungsgeometrie liegt der starre Rakel nur an den zwei höchsten Punkten der Schablone auf. In einigen Bereichen der Schablone verbleiben daher Reste (Abbildung 5-30) der Carbon-Gemische (nanoskalige Füllstoffe). Einige der Stoffe trocknen unter Raumbedingungen sehr schnell, so dass die geringen Mengen auf der Schablone innerhalb von wenigen Minuten angetrocknet waren. Bei einem zweiten Druckvorgang (ohne Zwischenreinigung) können die Reste verschleppt werden und

Große Öffnungen in der Schablone

Klumpchenbildung tritt auf. In den großen Druckflächen können so Depotschneisen oder Druckrillen (Abbildung 5-30) entstehen.

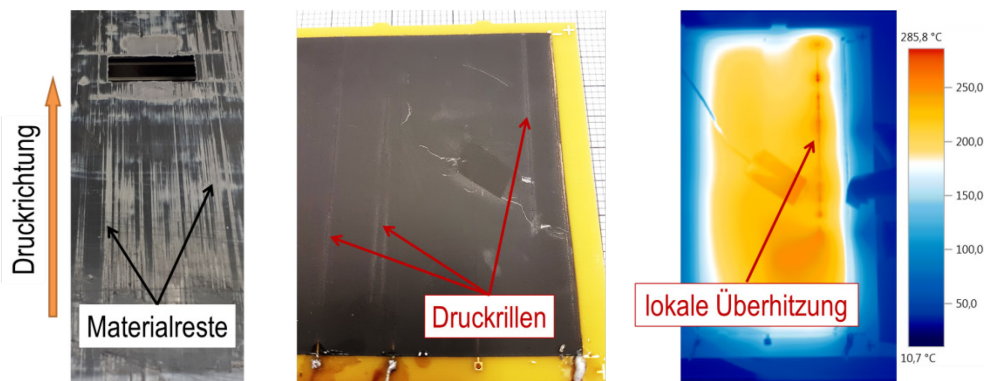


ABBILDUNG 5-30: DRUCKFEHLER (RILLEN) BEIM SCHABLONENDRUCK DURCH SCHNELL TROCKNENDE MATERIALRESTE; ANGETROCKNETE MATERIALRESTE AUF METALLSCHABLONE (LINKS); LOKALE RILLEN IN DER HEIZSCHICHT (MITTE); LOKALE ÜBERHITZUNG DURCH HÖHEREN WIDERSTAND IN DRUCKRILLE (RECHTS)

Diese Druckfehler sind für die Verwendung als Heizschicht als besonders kritisch zu bewerten. Die lokal reduzierte Schichtdicke in der Schneise hat hier einen höheren elektrischen Widerstand zur Folge. Wie in Abbildung 5-30 dargestellt, führt dies beim elektrischen Heizen zur Übertemperierung in den Rillen, die wiederum Schäden in der Schicht oder dem Substrat verursacht. Diese Druckfehler konnten verstärkt nach 2 bis 3 Druckdurchgängen mit den Materialien CP-3 und CP-5 beobachtet werden. Durch eine gründliche Reinigung von Schablone und Rakel nach jedem Druckprozess ließen sich die Fehler vermeiden.

5.3.3 LAMINIEREN DER RESISTIVEN FOLIEN

Für das Aufbringen der Folienmaterialien auf das Basismaterial muss eine andere Applikationsmethode genutzt werden als für die Gemische. Dies stellt einen klaren Unterschied in der Prozessreihenfolge zwischen den beiden Materialklassen dar. Als Möglichkeit zur Applikation bietet sich das Auflaminieren mit Prepreg-Material unter Druck und Temperatur an, wie es bereits im Abschnitt 2.1.3.2 beschrieben wurde. Für diese Arbeit stand zu diesem Zweck eine manuelle hydraulische Laborpresse [247] zur Verfügung. Mit dieser können Presstemperaturen bis zu 250 °C erreicht werden. Abbildung 5-31 zeigt eine schematische Skizze des Pressbereiches der Anlage sowie eine In-situ-Temperaturmessung an der inneren Prepreg-Lage (Typ: IT-180 [248]) von zwei zu verpressenden Laminaten.

Laminieren mit
Laborpresse

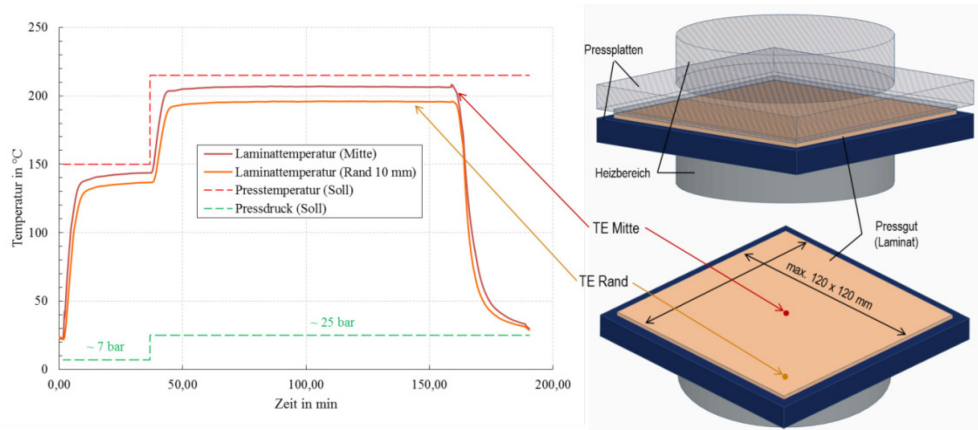


ABBILDUNG 5-31: TEMPERATURPROFIL BEIM LAMINIEREN VON ZWEI 1,5 MM DICKEN FR-4-SUBSTRATEN (LINKS) UND SCHEMATISCHER AUFBAU DER PRESSEINRICHTUNG MIT BEZEICHNUNG DER TEMPERATURMESSPUNKTE (RECHTS)

Der Pressbereich der Laborpresse ist auf max. 120 mm x 120 mm begrenzt und gibt somit die verwendbaren Probenabmessungen vor. Im thermischen Gleichgewicht (bei 215 °C) und bei größeren Proben muss von Temperaturgradienten zwischen Soll- und Ist-Temperatur in der Mitte ($\Delta T_{Mitte} \approx 10$ K) und in den Randbereichen ($\Delta T_{Rand} \approx 20$ K) ausgegangen werden. Das Manometer der Presse hat für die Masse m eine Einteilung von 1 t bis 15 t, wodurch eine Druckeinstellung nur toleranzbehaftet möglich ist. Die hier verwendeten Drücke p sind den jeweiligen Verarbeitungsempfehlungen der Prepreg-Datenblätter entnommen und wurden unter Einbeziehung der zu pressenden Fläche A nach

$$p = \frac{m_{Manometer} \cdot g}{A_{Laminat}} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

berechnet. Zusätzlich sind für die Pressprozesse Presspolster [249] und Trennfolien [250] auf beiden Seiten der Proben verwendet worden. Diese haben die Aufgabe, den Druck in der z-Achse gleichmäßig über die Probenfläche zu verteilen (vor allem bei strukturierten Oberflächen) und nach dem Prozess ein gutes Ablösen von den Pressplatten zu ermöglichen.

Für das Aufbringen der Carbon/Polyimid-Folien wurden zwei Varianten, das Laminieren mit der Polyimidseite zum Prepreg und mit der Carbonseite zum Prepreg, erprobt. Die entsprechenden Pressstapelungen sind in Abbildung 5-32 schematisch dargestellt.

Laminieren von
C/Pi-Folie

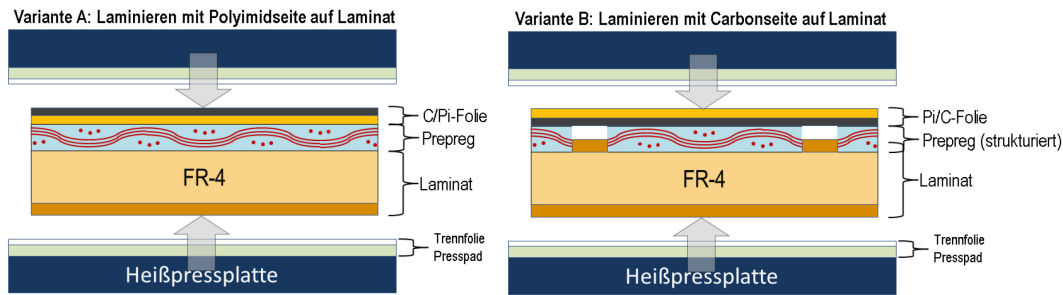


ABBILDUNG 5-32: SCHEMA DES SCHICHTAUFBAUES FÜR DAS VERPRESSEN VON POLYIMID/CARBON-FOLIEN AUF FR-4-LAMINAT MIT DER CARBONSEITE NACH AUßEN (LINKS) ODER MIT DER CARBONSEITE AUF ELEKTRODEN DER INNENLAGE (RECHTS)

Bei der ersten Variante wird Polyimidfolie entweder ganzflächig oder als Zuschnitt, entsprechend der Heizschichtgeometrie, auf die nicht-verkuferte Seite eines Basismaterials aufgepresst. Die Ankontaktierung der Carbon-Schicht erfolgt in Folgeprozessen. Für die zweite Variante wurden auf dem Basismaterial bereits die entsprechenden Elektroden zur elektrischen Ankontaktierung erzeugt und das Laminieren erfolgt durch strukturiertes Prepreg-Material (Freistellungen an den Elektroden). Beim Pressen entsteht ein elektrischer Kontakt zwischen den Elektroden und der Carbon-Schicht der Folie. Diese Variante fand nur für Grundsatzversuche Verwendung, da die Qualität der Verbindung als unzureichend bewertet wurde, um damit Langzeitversuche durchführen zu können. Vorteil bei dieser Variante ist die etwas bessere Haftfestigkeit der raueren Carbonfläche ($R_a = 0,22 \mu\text{m}$; $R_z = 1,65 \mu\text{m}$) auf dem ausgehärteten Prepreg gegenüber der planeren Polyimidseite ($R_a = 0,05 \mu\text{m}$; $R_z = 0,36 \mu\text{m}$) der Folie im Ausgangszustand.

Die Laminierprozesse stellen für die Heizmaterialien (und Basismaterialien) eine thermische und mechanische Belastung dar. An präparierten Proben wurde versucht, diesen Einfluss anhand von In-situ-Widerstandsmessungen während des Pressprozesses zu erfassen. In Abbildung 5-33 ist eine dieser Messungen für das Einlaminieren der C/PI-Folie dargestellt.

Prozesseinfluss auf Schichtwiderstand

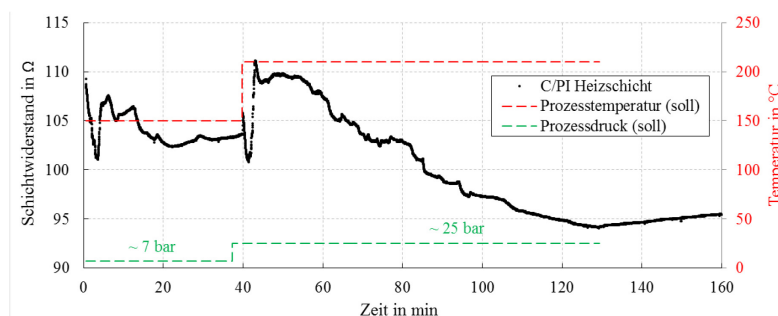


ABBILDUNG 5-33: VERLAUF DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES BEIM EINLAMINIEREN EINER C/PI-SCHICHT

Es ist zu erkennen, dass der Schichtwiderstand im Kurvenverlauf Schwankungen von bis zu 10 % unterliegt. Die Ursache dafür kann am Druck liegen, welcher eine mechanische Kompression des Polyimids und der darin enthalten Carbon-Partikel hervorruft. Die durch Kompression hervorgerufene Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von CB wird auch in [238] beschrieben und auf Umordnungen der Aggregate in dichtere Packungen, elastische und plastische Deformation der Partikel sowie auf die Neuorientierung von CB-Graphen-Schichten zurückgeführt. Außerdem ist zu erwarten, dass die Temperatur einen PTC/NTC-Effekt in der Schicht hervorruft. Genauer werden diese Effekte im Folgenden diskutiert. Allerdings wird bei den C/PI-Messungen ein Fehleinfluss durch die ungenügende Kontaktierung (hoher Übergangswiderstand, zusätzliche Klebeschicht) erwartet, welcher das Ergebnis in unbekannter Weise überlagert.

Das Aufbringen der Cu/NiP-Folie erfolgte gemäß dem in Abbildung 5-34 dargestellten Pressstapel. Durch das Treatment der Folie erfolgt eine gute Verbindung mit dem Prepreg und somit mit dem Substrat. Das Trägermaterial (Kupfer) muss hierbei stets nach außen gerichtet sein, damit es in weiteren Prozessschritten strukturiert wird, und so die eigentliche Heizschicht (NiP) freigelegt werden kann.

Laminieren von
NiP-Folie

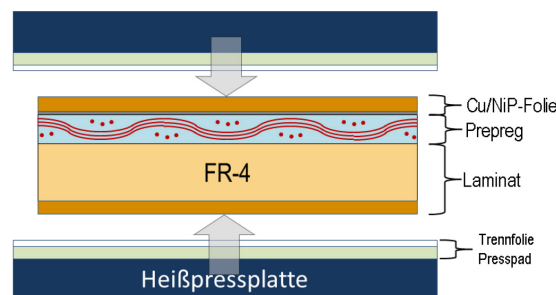


ABBILDUNG 5-34: SCHEMA DES SCHICHTAUFBAUS FÜR DAS VERPRESSEN VON KUPFER/NiP-FOLIE AUF FR-4-LAMINAT

Während des Laminierprozesses mit NiP-Schichten wurden ebenfalls In-situ-Widerstandsmessungen an den zu laminierenden Heizschichten durchgeführt. Hierbei muss beachtet werden, dass diese Materialien zum Zeitpunkt der Messung bereits einen vorherigen Pressprozess erfahren haben, da die Messung erst nach dem Freilegen der resistiven Schicht durchgeführt werden kann. Dementsprechend zeigt das Diagramm in Abbildung 5-35 den Verlauf des Schichtwiderstandes beim Einlaminieren zwischen zwei FR-4-Substraten.

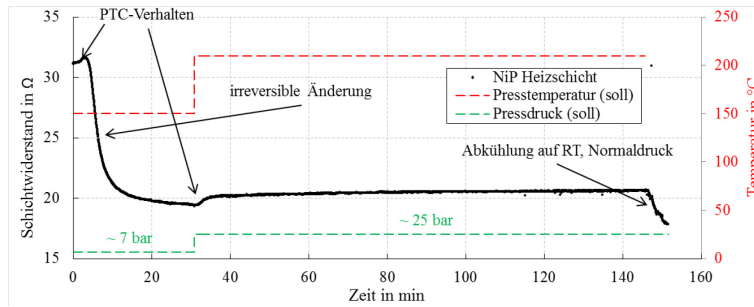


ABBILDUNG 5-35: WIDERSTANDSVORLAUF WÄHREND DES EINLAMINIERENS EINER NiP-HEIZSCHICHT

Die Anfangsbereiche, in denen die Proben die Soll-Temperaturen von 150 $^{\circ}\text{C}$ bzw. 215 $^{\circ}\text{C}$ annehmen, sowie der Bereich der Abkühlung am Ende der Kurve, deuten auf ein klassisches PTC-Verhalten hin. Dies wird auch durch die Untersuchungen in [251] bestätigt, nach denen unterhalb von ca. 24 at.-% Phosphor ein PTC-Verhalten zu beobachten war. Der irreversible Abfall des Schichtwiderstandes während des Temperns bei 150 $^{\circ}\text{C}$ deutet auf weitere Einflüsse hin. In [229] und [252] wird beschrieben, dass es durch Temperaturlagerung zur Veränderung der Mikrostruktur von amorph zu kristallin kommen kann. Nach [252] können verschiedene Gründe für die Widerstandsreduktion verantwortlich sein, wie ein verstärktes Kristallwachstum mit einer Verringerung der Grenzflächenstreuung oder ein Ausheilen von Gitterstörungen. Den Ausführungen von [253] zufolge beeinflusst der Grad der Kristallisation eine Vielzahl von Schichteigenschaften (elektrisch, magnetisch,...) und ist dabei eine komplexe Funktion von Phosphorgehalt, Temperatur, Heizrate, Zeit und vorangegangenen Belastungen. Es wird daher vermutet, dass auch bei den hier untersuchten NiP-Schichten ein Kristallisations-Effekt auftritt. Nach den Messungen handelt es sich hierbei um einen endlichen und irreversiblen Effekt. Die vermessenen Proben haben aber bereits einen kompletten Pressvorgang durchlaufen, weshalb eigentlich keine weiteren Änderungen bei einem erneuten Verpressen zu erwarten waren. Auch fällt auf, dass der Widerstandsabfall nur auf den Bereich von 150 $^{\circ}\text{C}$ begrenzt ist. Eine weitere Einflussgröße wäre in der mechanischen Änderung der Schichtstruktur beim Erweichen des umliegenden Harzes zu finden. Durch den einwirkenden Druck kann es zu einer Komprimierung der mit 400 nm sehr dünnen Schicht kommen.

5.4 WEITERVERARBEITUNG DER HEIZSCHICHTEN MITTELS LEITERPLATTENTECHNOLOGIEN

Neben den vorgestellten Applikations- und Laminierprozessen, die auch Bestandteil der Leiterplattentechnologie sind, wird sich in diesem Abschnitt mit weiteren Verarbei-

Inhalt des Abschnitts

tungsmöglichkeiten der applizierten Heizschichten befasst. Dies beinhaltet Möglichkeiten zur nachträglichen Strukturierung der Schichten, die als Alternative zum Strukturieren während des Druckprozesses mittels entsprechend strukturierter Siebe oder Schablonen zu sehen sind. Des Weiteren soll das Einlaminieren der Carbon-Schichten, die elektrische Kontaktierung sowie die Haftfestigkeit der Heizschichten auf FR-4-Materialien diskutiert werden.

5.4.1 STRUKTURIERUNG DER HEIZSCHICHTEN MITTELS LASERABTRAG BZW. ÄTZEN

Der Einsatz von Lasern und die damit verbundene Möglichkeit der berührungslosen, physikalischen Bearbeitung sind in der Elektronikfertigung weit verbreitet. Eingesetzt wird die Technologie zum Beispiel beim Bohren, Schneiden oder Ritzen von Leiterplatten sowie auch beim Punktschweißen [254] oder dem bereits vorgestellten Laserlöten (s. Abschnitt 3.1.2). Zudem besteht die Möglichkeit des ‚Prototypings‘ von Leiterplatten durch die Strukturierung des Leiterbildes im Ätzresist [255] oder direkt im Kupfer [256]. Bei gedruckten Bauelementen in der Dickschichttechnologie wird die Laserstrukturierung häufig zum Trimmen (Abgleichen) des Widerstandwertes einer resistiven Schicht verwendet, da es sich als schnelles und flexibleres Verfahren im Vergleich zum davor häufig angewendeten Sandstrahlabgleich erwiesen hat. Üblicherweise wird hier mit gepulsten Nd:YAG-Lasern mit $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ [52] oder mit CO₂-Lasern [257] gearbeitet. An dieser Stelle soll unter Einsatz eines Prototyping-Lasers für Leiterplatten die Strukturierbarkeit der hier untersuchten Heizschichten gezeigt werden. Bei dem eingesetzten Lasersystem handelt es sich um einen gepulsten Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm, einem Strahldurchmesser von 25 μm , Pulsfrequenzen zwischen 15 kHz bis 200 kHz und einer maximalen Leistung von 16 W. [258] Die Bearbeitung der verschiedenen Heizmaterialien erfolgte nach dem in Abbildung 5-36 dargestellten Prinzip.

Laserstrukturierung
allgemein

Laserabtrag zur
Bearbeitung der
Heizschichten

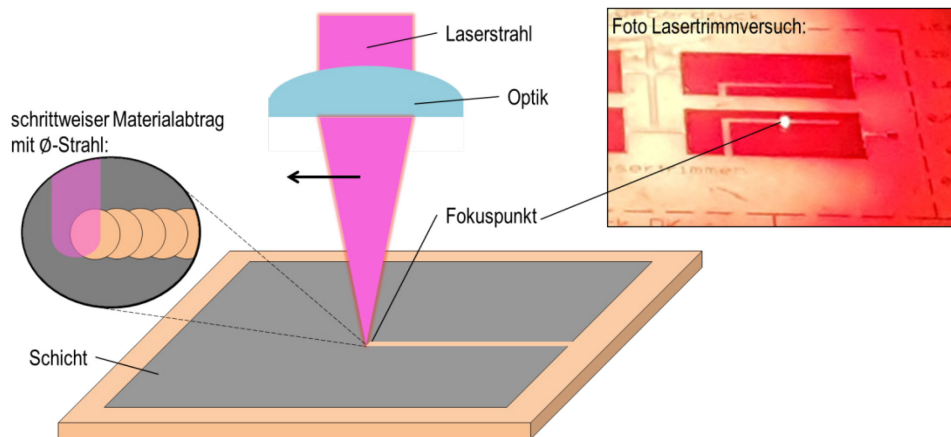


ABBILDUNG 5-36: GRUNDPRINZIP DER LASERSTRUKTURIERUNG EINER AUF LEITERPLATTENMATERIAL APPLIZIERTEN HEIZSCHICHT

Die Bearbeitbarkeit eines Werkstoffes (mittels Laser) hängt vor allem von dessen Absorptionsverhalten bei der jeweiligen Wellenlänge der Laserstrahlung ab. In Abbildung 5-37 ist das Absorptionsverhalten verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Metallische Werkstoffe absorbieren eine Laserwellenlänge von 1064 nm im Allgemeinen stärker als Polymere. [259] Für das Leiterplatten-Prototyping ist diese Eigenschaft von Vorteil, da mit geeigneten Parametern eine Beschädigung des Basismaterials beim Bearbeiten von Kupferauflagen minimiert werden kann.

Absorptionsverhalten
verschiedener
Werkstoffe

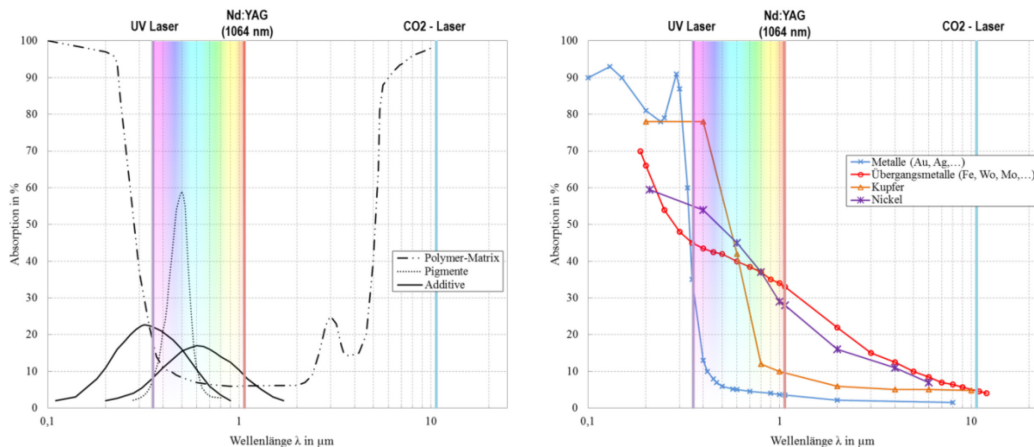


ABBILDUNG 5-37: ABSORPTIONSVERHALTEN VON KUNSTSTOFF SOWIE TYPISCHEN ADDITIVEN (NACH [260]) (LINKS) UND VON VERSCHIEDENEN METALLEN (NACH [261] UND [262]) (RECHTS)

Es wird davon ausgegangen, dass die notwendigen Laserparameter für die Bearbeitung der Carbon-Schichten denen von typischen Widerstandspasten ähneln. Ein Beispiel für übliche Laserparameter beim Widerstandsabgleich mit Nd:YAG-Lasern findet sich für eine 25 µm hoch gedruckte Dickschichtpaste in [263] mit einer Abtragsrate von

$10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ bis $25 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$, einer Frequenz von 2 kHz bis 5 kHz und einer durchschnittlichen Leistung von 0,8 W bis 1,5 W.

Ausgehend von verfügbaren Literaturwerten wurden für die verschiedenen Heizschichten Parameterstudien auf Basis praktischer Versuche durchgeführt. Als Probenschichten wurden häufig die großen Flächen (Bereich: d) auf dem bedruckten (Gemische) oder geätzten (NiP-) Drucktestboard (**Anhang F**) genutzt. Somit konnte neben FR-4 auch Kupfer als Unterlage für die zu bearbeitende Schicht untersucht werden. Das ist vor allem für die Carbon-Gemische interessant. An die Laserbearbeitung der Carbon-Schichten auf FR-4-Oberflächen besteht zudem die Herausforderung, dass sowohl die Polymermatrix der Schichten, wie auch das Epoxidharz des Substrates, in ihrem Absorptionsverhalten sehr ähnlich sind. Bei weniger optimal eingestellten Parametern wurde daher häufig eine Beschädigung der freigelegten Substratoberfläche beobachtet. In Abbildung 5-38 ist dies sowie ein aus zu niedriger Laserintensität resultierender unvollständiger, Schichtabtrag dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei den beschädigten Substratoberflächen stellenweise das Glasfasergewebe freigelegt wird. Dies kann in Wechselwirkungen mit Feuchtigkeit ein erhöhtes CAF-Risiko bedeuten.

Laserparameter zur
Strukturierung

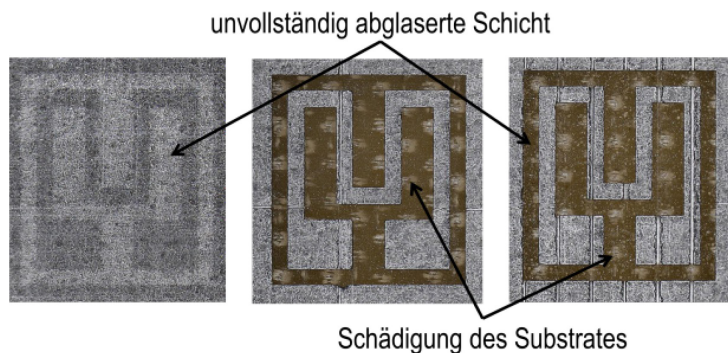


ABBILDUNG 5-38: BEISPIELE FÜR SCHLECHT ABGESTIMMTE LASERPARAMETER BEI DER STRUKTURIERUNG VON CP-5

Mit abgestimmten Parametern konnte dagegen mit allen Heizschichten eine saubere Strukturierung erreicht werden. In Abbildung 5-39 sind exemplarisch Aufnahmen für strukturierte CP-1-Schichten sowie für die entstandene Laserflanke dargestellt. Die kombinierte Strukturierung von Schicht auf Kupfer und FR-4 mit einem Parametersatz wird für die Carbon-Gemische als besonders wichtig angesehen, da diese stets auf Elektroden auf dem Substrat angewiesen sind.

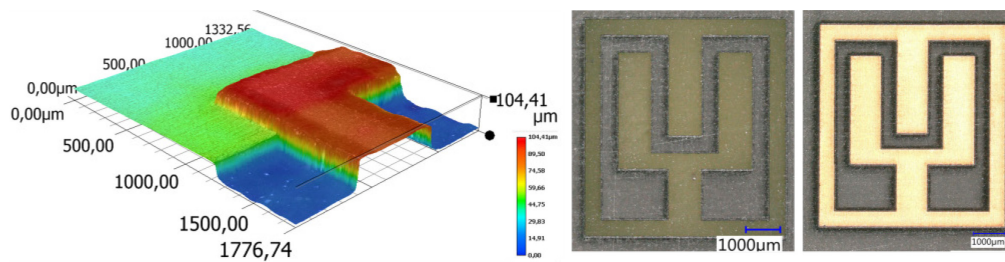


ABBILDUNG 5-39: LASERSTRUKTURIERTE CP-1-SCHICHTEN; 3D-MESSUNGEN EINER GELASERTEN STRUKTUR AM ÜBERGANG ZU KUPFER (LINKS); SCHICHT AUF FR-4 BZW. KUPFER (RECHTS)

In Tabelle 5-4 sind die Laserparameter zusammengefasst, mit denen die besten Ergebnisse bei der Strukturierung der verschiedenen Heizschichten auf dem jeweiligen Untergrund erreicht werden konnten.

TABELLE 5-4: OPTIMIERTE LASERPARAMETER FÜR DAS STRUKTURIERUNG VERSCHIEDENER HEIZSCHICHTEN MITTELS LASER

	CP-1	CP-2	CP-3	CP-5	NiP	C/PI
FR-4	f = 75 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 5x gelasert	f = 75 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 4-5x gelasert	f = 75 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 4x gelasert	f = 60 - 75 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 3x gelasert	f = 75 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 1 - 2x gelasert	<i>selektives Lasern der C-Schicht auf PI:</i> f = 15 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 9x gelasert
Kupfer	f = 30 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 7x gelasert	f = 30 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 6x gelasert	f = 30 - 45 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 4 - 5x gelasert	f = 30 kHz P = 3 W v = 200 - 300 mm/s 4 - 5x gelasert		
FR-4/Cu	f = 30 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 7x gelasert	f = 30 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 4x gelasert	f = 30 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 4-6x gelasert	f = 30 kHz P = 3 W v = 250 mm/s 3x gelasert		

Die generelle Einsetzbarkeit der zuvor ermittelten Bearbeitungsparameter der Laserstrukturierung soll hier am Beispiel von Lasertrimmversuchen veranschaulicht werden. Hierzu wurden zwei Geometrien, der I-Schnitt und der L-Schnitt, welche für das Trimmen von Widerständen typisch sind, verwendet. Der I-Schnitt ist so gewählt worden, dass er etwa die halbe Länge der Widerstandsschicht schneidet. Der L-Schnitt verteilt sich auf drei Varianten, die etwa 25 %, 50 % bzw. 75 % senkrecht in die Widerstandsschicht hineinragen. In Abbildung 5-40 sind die gelaserten Strukturen für CP-1-Schichten sowie die gemessenen Widerstandsänderungen nach dem Trimmen für verschiedene Heizmaterialsichten dargestellt. Unterhalb der Materialien weichen die Änderungen in ihrem Betrag voneinander ab. Dies kann auf inhomogene Ausgangsschichten und auf Ungenauigkeiten in der Positionierung durch manuelles Ausrichten der Laserdaten zum Layout zurückzuführen sein.

Beispiel
Lasertrimmen

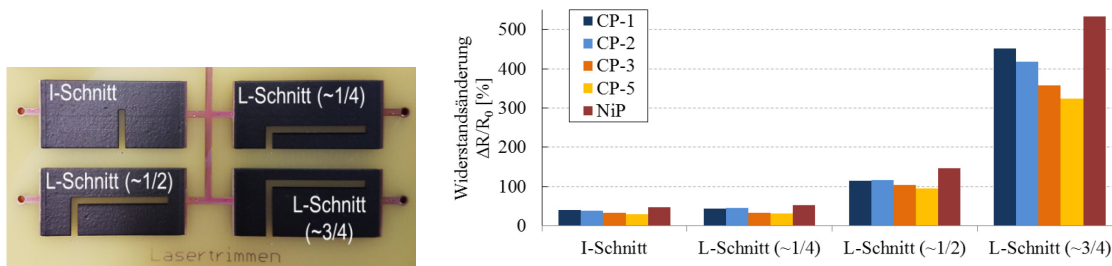


ABBILDUNG 5-40: BEISPIELVERSUCH ZUM LASERTRIMMEN VERSCHIEDENER HEIZSCHICHTMATERIALIEN MIT TYPISCHEN TRIMM-STRUKTUREN; AUFNAHME STRUKTURIERTER CP-1-WIDERSTÄNDE (LINKS); WIDERSTANDSERHÖHUNG DURCH LASERTRIMMEN VERSCHIEDENER SCHICHTEN (RECHTS)

Obwohl gezeigt wurde, dass eine Strukturierung der NiP-Schicht mittels Laserabtrag durchführbar ist, bietet sich hierfür eine nasschemische Strukturierung an. Diese erfolgt auf ähnliche Weise wie die Kupferstrukturierung bei der Standard-Leiterplattenfertigung, die bereits in Abschnitt 2.1.3.1 vorgestellt wurde. Das NiP-Material erfordert einen zusätzlichen Ätzschritt sowie eigene Maskierung, so dass der in Abbildung 2-11 dargestellte Fertigungsablauf erweitert werden muss. Der hier verwendete Prozessablauf findet sich in Abbildung 5-41.

Ätztechnische Strukturierung der NiP-Schicht

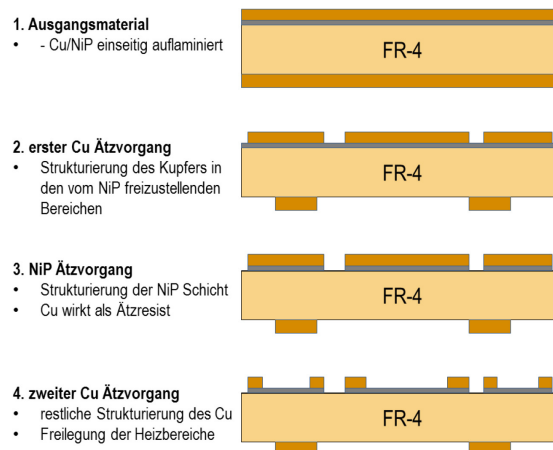
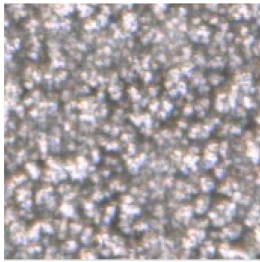
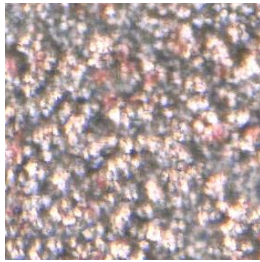
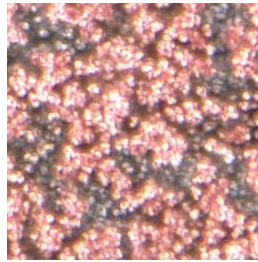

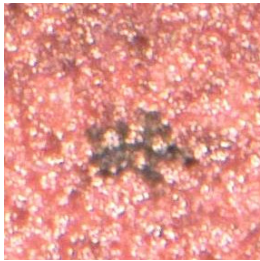
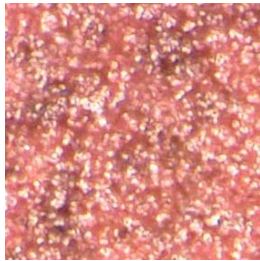
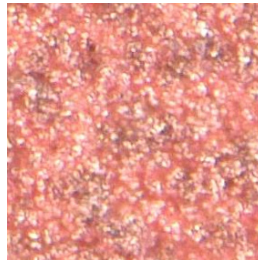


ABBILDUNG 5-41: PROZESSABLAUF ZUR NASS-CHEMISCHEN STRUKTURIERUNG DER NiP-SCHICHTEN AUF LEITERPLATTEN

Entgegen dem Standard-Prozess werden zunächst nur die Bereiche im Kupfer strukturiert, in denen die NiP-Schicht im zweiten Schritt entfernt werden soll. Das restliche Kupfer fungiert derweil als Ätzresist für die abgedeckten Bereiche der resistiven Schicht. Als Ätzmittel für derartige Schichten wird in [264] eine Lösung aus Kupfersulfat (CuSO_4) mit Wasser und Schwefelsäure (H_2SO_4) empfohlen. Nickel hat mit $-0,23 \text{ V}$ ein niedrigeres Redoxpotential als Kupfer ($+0,35 \text{ V}$). Daher wird das Nickel von der CuSO_4 Lösung oxidiert und geht als Nickel-Ion in Lösung. Die Schwefelsäure verhindert dabei die Ausfällung basischer Kupfersalze. Die Ätzdauer im manuell durchgeführten Pro-

zess kann bis zu 15 min betragen und ist abhängig von den Prozessparametern (Temperatur, Bewegung im Bad) wie auch von der Standzeit der Widerstandsschicht. In Tabelle 5-5 sind exemplarisch NiP-Schichten nach unterschiedlichen Ätzzeiten mit einer CuSO_4 -Lösung dargestellt.

TABELLE 5-5: ABTRAG EINER NiP-SCHICHT BEIM ÄTZEN MIT CuSO_4

Mikroskop-Aufnahmen einer NiP-Schicht auf Kupfer-Träger			
	Ausgangszustand	150 s	300 s
Ätzdauer:			
	450 s	600 s	750 s
			
		900 s	

Die Gleichmäßigkeit des Ätzprozesses wird auch durch das Treatment-Profil mitbestimmt. Je gleichmäßiger die Schichttiefe, umso präziser kann der Ätzprozess durchgeführt werden und desto steiler wird die Ätzkante. [52] Dieser Effekt der Ätzhomogenität ist vor allem in den Mikroskopaufnahmen mit der Ätzdauer von 150 s und 300 s zu erkennen. Inhomogenitäten zwischen größeren Bereichen einer zu ätzenden Schicht sind eher auf Ungleichmäßigkeiten infolge des manuellen Ätzprozesses im ruhenden Medium zurückzuführen. Anschließend wird in einem zweiten Kupfer-Ätzschritt das finale Leiterbild erzeugt. Somit sind die Bereiche im NiP freigelegt, welche hier als Heizschicht dienen sollen. Für diesen Prozess wird nach [265] ein alkalischer Ätzprozess mit streng einzuhaltenden Bad- und Prozessparametern gefordert, da es bei der Verwendung saurer Lösungen zu einem Anätzen der Widerstandsschicht kommen kann. In den Bereichen die Kupferleiter enthalten, sind die resistiven Eigenschaften der dort verbleibenden NiP-Schicht durch den vielfach höheren Leitwert des Kupfers zu vernachlässigen.

Um die applizierten und strukturierten NiP-Schichten besser mit den Carbon-Gemischen vergleichen zu können, wurden die gleichen Drucktestlayouts auch mit NiP als Heizschicht hergestellt. Im Gegensatz zu den Gemischen, deren Strukturgenauig-

Reproduzierbarkeit
der NiP-Strukturen

keit von der Maskierung und Druckqualität mit Schablonen und Sieben abhängig ist, bestimmt hier die Genauigkeit des Ätzprozesses (Kupfer und NiP) das Endergebnis. Im exemplarischen Vergleich von zwei Testboards fällt zunächst ein sehr gleichmäßiges Widerstandsverhalten der erstellten Strukturen auf. Die Vermessung der R_{\square} – Bereiche auf den Testboards hat im Vergleich eine Standardabweichung von weniger als 2 % zwischen den Strukturen ergeben. (Abbildung 5-42) Etwas größer ist die Abweichung der Messwerte zwischen einzelnen Boards. Dies kann auf unterschiedliche Ätzparameter im manuellen Laborprozess sowie auf unterschiedliche Temperaturbelastungen beim Auflaminieren der Cu/NiP-Folie (Kristallisationseffekt) zurückgeführt werden.

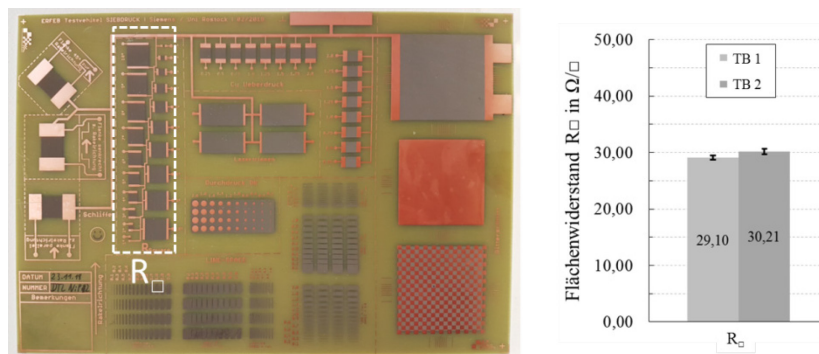


ABBILDUNG 5-42: NASS-CHEMISCHE HERGESTELLTE NiP-TESTBOARDS ZUM VERGLEICH DER STRUKTURGENAUIGKEIT

Eine alternative Methode zur Strukturierung der NiP-Schichten, auf die hier nur kurz eingegangen werden soll, ist die Kombination von Laserprototyping und nass-chemischem Ätzen. Bei dieser Vorgehensweise werden zunächst die Bereiche im Layout mittels Laserprototyping strukturiert, die später kein Kupfer oder NiP enthalten sollen. Da der Laserstrahl hierbei die adhäsive Schicht unterhalb der Metallfolie aufweicht, kann die gesamte Folie abgetragen werden. Im Anschluss ist erneut ein alkalischer Kupferätzprozess zur finalen Strukturierung und NiP-Freilegung erforderlich. Der Vorteil dieses Ablaufes ist, dass keine zusätzliche Chemie und weitere Ätzprozesse für die Heizschichtstrukturierung eingesetzt werden müssen. Dennoch wird diese Fertigungsverfahren nicht favorisiert, da sie ungeeignet für die Standard-Leiterplattenfertigung ist. Abbildung 5-43 zeigt einen Versatz zwischen NiP-Schicht und Kupferleiter, der durch ungenaues Ausrichten der nass-chemischen Maskierung zum laserstrukturierten Bereich entstehen kann. Es sind zudem die Schneidbahnen des Laserstrahls im unteren Teil des Bildes zu erkennen.

Kombination von
Lasterstrukturierung
und Ätzabtrag

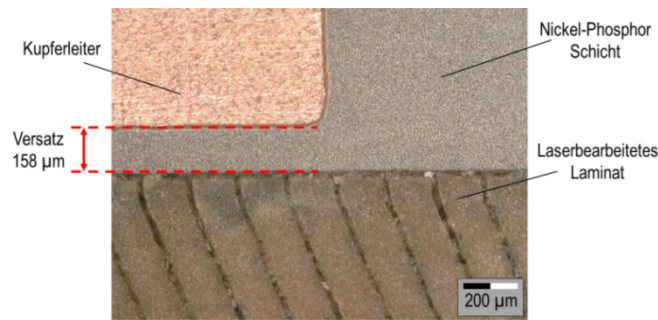


ABBILDUNG 5-43: ÜBERGANG ZWISCHEN KUPFER, NiP UND ISOLATOR EINER MITTELS LASERPROTOTYPING UND KUPFERÄTZENS GEFERTIGTEN PROBE

5.4.2 INTEGRATION DER GEDRUCKTEN CARBON-SCHICHTEN INS BASISMATERIAL

Die Integration der Heizschichten in das Basismaterial der Leiterplatte ist für die spätere Anwendung sinnvoll. Bei elektronischen Baugruppen dient dies, analog zur Multilayer-ertechnik, der Platzeinsparung auf den Außenlagen. Diese sind vorrangig als Trägerfläche für die Bauelemente und als Verdrahtungsebene vorgesehen. Des Weiteren bietet die Integration der Schichten einen erhöhten Schutz gegen Wechselwirkungen mit dem Umgebungsklima (z.B. Feuchtigkeit). Die thermischen Verluste, bei eingebetteter Anwendung, sind zudem vermindert. Ein direkter konvektiver Kontakt mit der Umgebung würde höhere Verluste und damit auch höheren Bedarf an Leistungsdichte bedeuten.

Zweck der Integration

Der Integrationsprozess wird hier für alle Materialien durch das Laminieren mittels Prepreg in mindestens zwei starre Lamine erreicht. Hierbei bestimmt die Dicke der verwendeten Lamine (und die des Prepregs) die Einbetttiefe der Heizschicht. Für prinzipielle Untersuchungen wurden Standardlamine der Dicke 1,55 mm verwendet. Beim Untersuchen der Anwendung als Heizschicht ist es vorteilhaft, das Laminat zwischen Heizschicht und der primär zu beheizenden Lage möglichst dünn auszuführen. Dies wurde bereits in der Vorbetrachtung in Abschnitt 3.2.1 diskutiert. Hier wurden minimale Laminatdicken bis zu 0,1 mm Stärke eingesetzt.

Materialstärken

Der Pressvorgang stellt einen thermisch intensiven Prozess dar, bei dem die üblichen Presstemperaturen im Bereich 150 °C bis 210 °C, je nach verwendeten Prepregtyp, liegen. Es ist nötig, diese Temperatur über einen Zeitraum von 1 h bis 2 h zu halten, um eine vollständige Vernetzung im Prepreg zu erreichen. Die Messungen beim Laminieren haben bereits gezeigt, dass die Schichtwiderstände in den hier hergestellten Heizschichten von diesem thermischen Prozess beeinflusst werden. Von den verschiedenen Carbon-Schichten mit unterschiedlichen Polymermatrizen wird ebenfalls ein thermischer Einfluss auf deren Struktur erwartet. Aus diesem Grund werden im Folgenden die in-situ gemessenen Widerstandsverläufe an den Gemischen CP-1 bis CP-3 und

Widerstandsmessung beim Laminieren

CP-5 während des gesamten Pressprozesses dargestellt. Die prinzipielle Messanordnung hierzu ist in Abbildung 5-44 dargestellt.

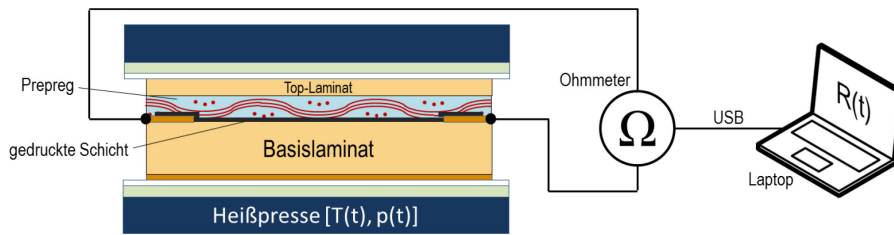


ABBILDUNG 5-44: PRINZIP DES MESSAUFBaus ZUR IN-SITU-WIDERSTANDSMESSUNG BEIM EINLAMINIEREN DER GE-DRUCKTEN HEIZSCHICHTEN

Beispielhafte Verläufe für die gemessenen Änderungen im elektrischen Schichtwiderstand der eingebetteten Heizschichten beim Laminieren werden in Abbildung 5-45 bis Abbildung 5-48 dargestellt. Es fällt auf, dass die Kurvenverläufe in ihrer grundlegenden Tendenz zwischen den verschiedenen Materialien sehr ähnlich sind. Zu Beginn der Prozesse wird auf die Proben ein mechanischer Druck ausgeübt und die Ist-Temperatur steigt innerhalb von ca. 5 min auf ca. 150 °C. Bei allen Schichten steigt während dieser Zeit der gemessene Widerstandswert auf ein Maximum an.

Widerstandsverläufe

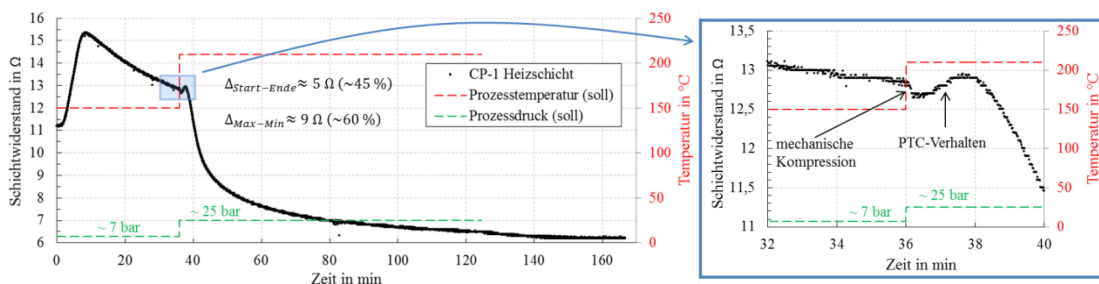


ABBILDUNG 5-45: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-1-HEIZSCHICHT

Dieser Widerstandspeak ergibt sich bei den Schichten CP-1, CP-2 bzw. CP-5 aus prozentualen Anstiegen von 27 %, 16 % bzw. 36 % gegenüber dem Ausgangswert der jeweiligen Schicht. Besonders auffällig ist der Anstieg von CP-3, dessen Ausgangswert sich hierbei verdreifacht. Nachdem die Schichten ein thermisches Gleichgewicht während der ersten Pressstufe erreicht haben, beginnt der Widerstandswert bei allen gemessenen Proben langsam abzufallen. Besonders stark ausgeprägt ist dies im Verlauf von CP-1 (Abbildung 5-45) zu erkennen.

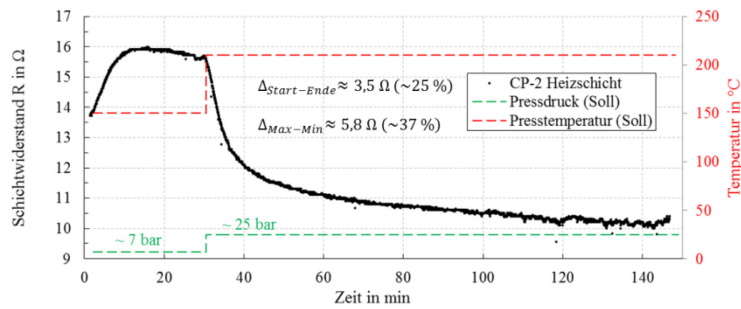


ABBILDUNG 5-46: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-2-HEIZSCHICHT

Nach ca. 30 min bis 35 min beginnt die zweite Pressstufe, bei welcher der Druck unmittelbar auf ca. 25 bar erhöht wird und die Temperatur bis auf ca. 210 °C ansteigt. Zu diesem Zeitpunkt sollte die jeweilige Polymermatrix (Acrylat, Epoxid, ...) der unterschiedlichen Carbon-Schichten bereits weich geworden sein. Aus den sprunghaftigen Widerstandsabfällen von CP-1 und CP-5 (Abbildung 5-48) wird daher auf eine mechanische Kompression innerhalb der Schicht und eine daraus resultierende Abstandverringerung zwischen leitfähigen Carbon-Partikeln geschlossen.

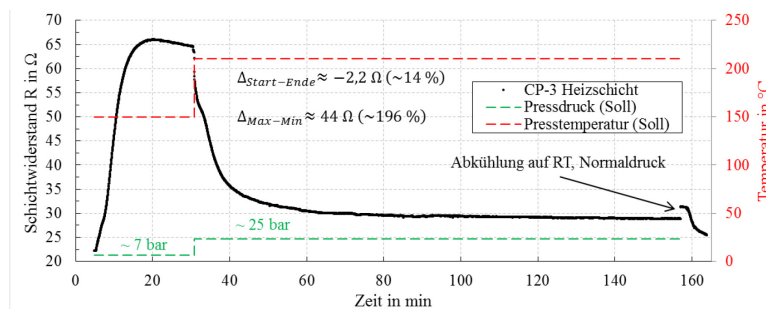


ABBILDUNG 5-47: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-3-HEIZSCHICHT

Bei den genannten Schichten ist im Anschluss ein kurzer PTC-Anstieg infolge der zeitlichen Temperaturerhöhung erkennbar. Dieser wird wiederum kurz darauf von einer exponentiellen Reduktion des Schichtwiderstandes überlagert, welche bei allen Stoffen zu beobachten ist. Bei den meisten Schichten ist dieser Abfall auch nach ca. 90 min bei 210 °C noch nicht beendet. Nach Prozessende zeigen die Schichten CP-3 und CP-5 einen möglichen Relaxations-Effekt, sobald der Druck verringert wird, der wiederum von einem PTC-Verlauf gefolgt ist, während die Probe abkühlt.

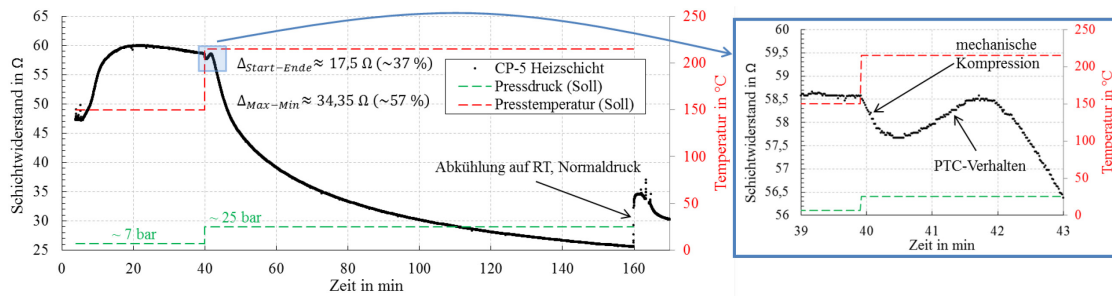


ABBILDUNG 5-48: IN-SITU GEMESSENER WIDERSTANDSVERLAUF BEIM EINLAMINIEREN EINER CP-5-HEIZSCHICHT

Für das gemessene Widerstandsverhalten der Schichten finden sich in der Literatur verschiedene Studien und Erklärungsmodelle. In [266] wird zum Beispiel beschrieben, dass sich die Resistivität einiger Carbon-Black gefüllter Polymere deutlich erhöht, wenn der Verbundwerkstoff seine Schmelztemperatur erreicht. Dieser Widerstandssprung kann dabei mehrere Größenordnungen umfassen und ist u.a. vom Grad der Kristallisierung [267] und vom Grad der Vernetzung [268] abhängig. In [267] konnte ein PTC-Effekt auch an hochgefüllten, amorphen Polymeren beobachtet werden. Ein NTC-Effekt wurde in [268] an unvernetzten Polymerstoffen (kristallin) oberhalb der Schmelztemperatur beobachtet. Nach vollständiger Vernetzung war das NTC-Verhalten nicht mehr gegeben. Eine Erklärung für den hohen Widerstandssprung liefert [269] mit dem Aufbrechen der leitfähigen Pfade durch die plötzliche Volumenexpansion der Polymermatrix beim Erreichen der Schmelztemperatur bzw. Glasübergangstemperatur. Es kann davon ausgegangen werden, dass in den hier verwendeten Schichten die Glasübergangstemperatur während der ersten Pressphase (150 °C) bereits erreicht bzw. überschritten wurde. Eine Deutung des anschließenden NTC-Effekt liefert zum Beispiel [270]. Danach ruft eine weitere Erhöhung der Temperatur eine thermisch angeregte Verschiebung der Polymerketten hervor. Dies hat wiederum eine fortschreitende Umlagerung der leitfähigen Füllstoffe (Partikel und Aggregate) zur Folge, wodurch sich erneut leitfähige Pfade ausbilden. In der zweiten Pressphase überwiegt demnach die Neubildung gegenüber der Zerstörung der Pfade durch die thermische Expansion. Genau genommen beginnt diese Überlagerung bereits in der ersten Pressphase mit einem leichten Ansteigen der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit nach dem Widerstandsspeak und ist bei CP-1 besonders ausgeprägt.

Bei den hier verwendeten Schichten wird außerdem eine starke Beeinflussung auf die elektrischen Parameter durch den Grad der Feuchtebelastung in der Schicht erwartet. Vergleichsmessungen von unmittelbar vor dem Laminierprozess getrockneten Schichten haben allerdings keine Änderungen gegenüber dem zuvor gemessenen Widerstandsverhalten gezeigt.

Diskussion der
Messdaten

Einfluss von
Feuchtigkeit

Die hohen Schwankungen der Schichtwiderstände beim Pressvorgang müssen beachtet werden, wenn eine aktive Nutzung der Heizstruktur im Pressprozess vorgesehen ist. Durch das wechselseitige Auftreten von PTC- und NTC-Verläufen ist eine Regelung für endogen geheizte Laminierprozesse (Abbildung 5-49) unumgänglich. Besonders ein NTC-Verhalten birgt das Risiko von Überhitzungen, wenn keine Leistungskompensation infolge der Widerstandsverringerung erfolgt.

Konsequenz für
endogen beheiztes
laminieren

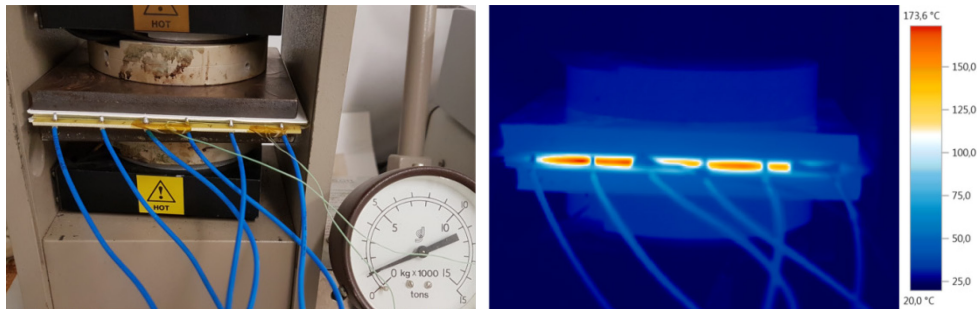


ABBILDUNG 5-49: TESTAUFBAU EINES LEITERPLATTEN-PRESSVORGANGES MIT ENDOGEN BEHEIZTEM LAMINAT (FÜNF PARALLELE HEIZSEGMENTE)

5.4.3 KONTAKTIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Die elektrische Kontaktierung der Heizschichten ist erforderlich, um Joulesche Verluste in diesen erzeugen zu können. Hierbei werden eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stromdichte in einer homogenen resistiven Schicht und ein geringer Übergangswiderstand (s. Abschnitt 2.1.2.2) zwischen den Kontaktpartnern (Elektrode und Heizmaterial) angestrebt. Als Elektrodenmaterial auf der Leiterplatte bietet sich die Verwendung von Kupferleiterbahnen an. Heizstrukturen aus Kupfermäandern, die für einige Grundsatzversuche verwendet wurden, stellen sowohl Heizstruktur wie auch Kontaktfläche in einem auf der Leiterplatte dar. Die Kontaktierung im Labor nach außen (Mess-technik, Leistungsversorgung) kann über metallische Kontaktklemmen oder direktes Anlöten der Zuleitung erfolgen. Auf Grund ihres relativen geringen Kontaktquerschnittes kann bei der Verwendung von Klemmen bereits ein Übergangswiderstand von mehreren 100 mΩ (je Klemme) gemessen werden. Daher werden für die Messung von Widerstandsverläufen und beim Heizen niederohmigere, stoffschlüssige Lötverbindungen bevorzugt.

Kontaktierung von
Kupfer

Die Verbindung der gedruckten Schichten mit der elektrischen Versorgung wurde durch einen Überdruck von Kupferelektroden mit den Gemischen erreicht. Wie bereits gezeigt wurde, definiert die Breite der Kupferbahnen zusammen mit deren Abstand dabei die effektive Heizfläche einer applizierten Schicht. Mit der Höhe der geätzten Kupferelektroden erhöht sich dabei auch die lokale Höhe der Heizschicht. In Abbildung

Kontaktierung ge-
druckter Schichten

5-50 ist ein Beispiel für den Überdruck einer geätzten Kupferelektrode durch eine siebgedruckte Carbon-Paste dargestellt.

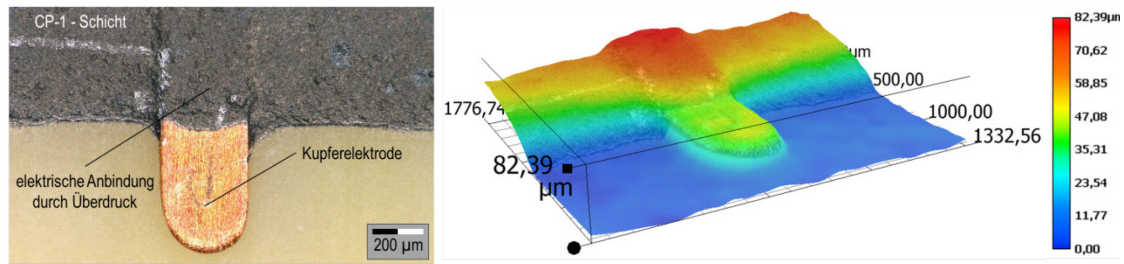


ABBILDUNG 5-50: BEISPIEL FÜR ELEKTRISCHE ANKONTAKTIERUNG EINER GEDRUCKTEN HEIZSCHICHT (CP-1) DURCH ÜBERDRUCK EINES KUPFERLEITERZUGES ($D = 35 \mu\text{m}$)

Die Höhe der Kupferauflage soll möglichst gering gehalten werden, um den Druckprozess nicht zu beeinträchtigen. Diese Empfehlung findet sich auch in [271] und [272], in denen maximal $14 \mu\text{m}$ als Kupferdicke genannt wird.

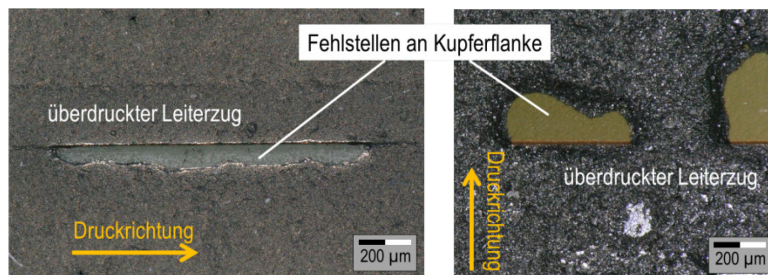


ABBILDUNG 5-51: BEISPIELE FÜR VEREINZELTE FEHLSTELLEN BEIM DRUCKPROZESS VON CARBON-GEMISCHEN AN LEITERZUGFLANKEN; MIT CP-1 BEI DRUCKRICHTUNG PARALLEL ZUR KUPFERFLANKE (LINKS); MIT CP-5 BEI DRUCKRICHTUNG SENKRECHT ZUR KUPFERFLANKE (RECHTS)

In dieser Arbeit kamen, je nach verfügbarem Basismaterial und Untersuchung, verschieden starke Kupferauflagen zum Einsatz. Für die Heizanwendung wurde darauf geachtet, max. $18 \mu\text{m}$ Kupfer auf den Leiterplatten zu verwenden, um dessen Kühlungseffekt beim Heizen der Schichten und beim thermischen Aushärten der Gemische zu minimieren.

Der notwendige Bereich für die Überlappung der gedruckten Schichten mit Kupfer wurde mit Teststrukturen ermittelt, die in dem in **Anhang F** dargestellten Testboard enthalten sind. Auf den Platinen werden die Elektroden so zueinander positioniert, dass zwischen dem Kupfer eine Fläche von $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ entsteht. Für den Druck von Carbon-Schichten wurden die Überlappungen der Öffnungen im Sieb so angepasst, dass die Kupferleiter mit $0,25 \text{ mm}$ bis 2 mm je Elektrode überdruckt werden konnten. (Abbildung 5-52) Unter idealen Bedingungen sollte eine elektrische Widerstandsmessung der

Überlappung auf
Kupferelektrode

Strukturen stets den gleichen Schichtwiderstand zeigen. Eine exemplarische Messung dieser Untersuchung für CP-1-Schichten ist in Abbildung 5-52 dargestellt.

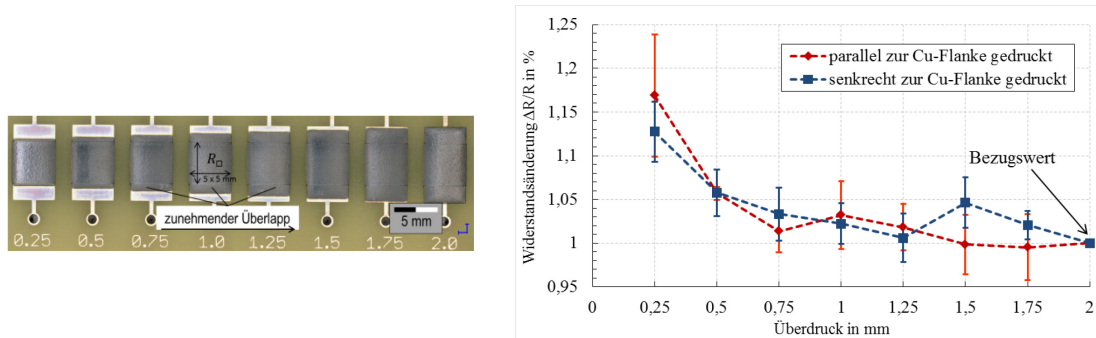


ABBILDUNG 5-52: VERMESSUNG DES NOTWENDIGEN ÜBERDRUCKS EINER CARBON-SCHICHT (HIER CP-1) AUF KUPFER; TESTLAYOUT MIT VARIERTEM ÜBERDRUCK UND GLEICHBLEIBENDEM R_{\square} (LINKS); ABHÄNGIGKEIT DES GEMESSENEN WIDERSTAND VOM ÜBERDRUCK BEZOGEN AUF DEN LETZTEN WERT (RECHTS)

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass zu geringe Überlappdrucke vermieden werden sollten. Die dann gemessenen Widerstände weichen stärker von den zu erwarteten Widerständen ab. Eine Ursache dafür liegt in der Positioniergenauigkeit der Maskierung beim Druckprozess. In den durchgeführten Untersuchungen wurde stets ein Überlappbereich > 1 mm verwendet. In [234] wird zum Beispiel für die Anwendung als Tippkontakte ein idealer Überlappbereich von 1,5 mm zwischen Kupfer und einer Carbon-Schicht angegeben.

Mit Mikroskopen wurden an metallographischen Querschliffen visuelle Inspektionen der Grenzflächen zwischen dem Leiterplattenkupfer und den aufgedruckten Schichten durchgeführt. An den meisten Proben trat ein fehlstellenfreier Übergang zwischen Metall und leitfähigem Verbundwerkstoff auf. Das Beispiel in Abbildung 5-53 zeigt die REM-Aufnahme einer Cu-/ CP-2-Grenzfläche. In der Heizschicht sind nochmal die unterschiedlichen Carbon-Partikel zu erkennen, die den Kontakt zum Kupfer bilden.

Übergang zwischen Carbondruckschicht und Kupfer

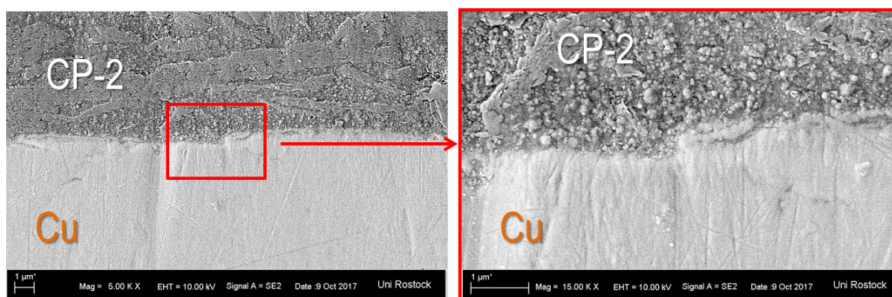


ABBILDUNG 5-53: REM-AUFNAHME EINES QUERSCHLIFF MIT ÜBERGANG ZWISCHEN EINER KUPFERELEKTRODE ZU EINER CP-2-SCHICHT

In Abbildung 5-54 ist die Rissbildung innerhalb einer CP-2 Schicht oberhalb des Kupfers dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Riss von einem in der Schicht gebildeten Kocher ausgeht. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit der Rissausbildung an Voids in Lötverbindungen. [273] Unklar ist, ob der Riss bereits in der Probe vorhanden war, als sie vergossen wurde, oder ob die mechanische Belastung beim Schleifprozess das Risswachstum initiiert hat. Analog zum Risswachstum in Lötstellen ist aber zu erwarten, dass eine thermische Wechselbelastung (z.B. aktives Heizen) eine Rissausbildung in den Carbon-Schichten begünstigt.

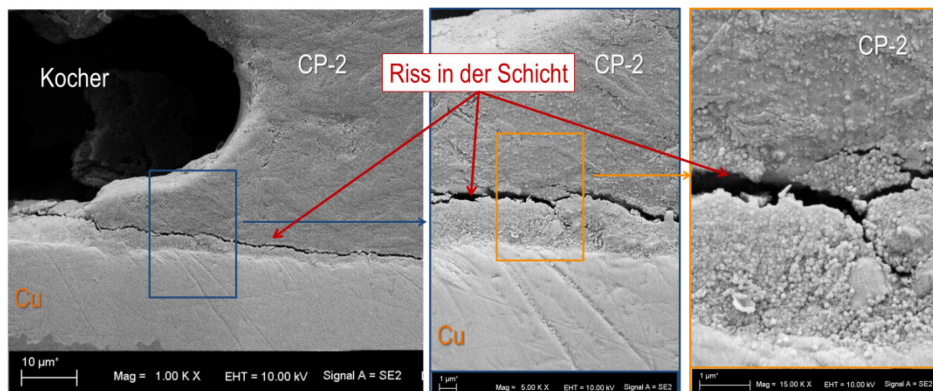


ABBILDUNG 5-54: REM-AUFNAHME EINES QUERSCHLIFF MIT ÜBERGANG ZWISCHEN EINER KUPFERELEKTRODE ZU EINER CP-2-SCHICHT MIT VON EINEM KOCHER AUSGEHENDEM RISS

Ein Vorteil der NiP-Folie besteht darin, dass die Kupferschicht zur elektrischen Kontaktierung der NiP-Heizstruktur bereits vorhanden ist. Somit können mittels der bereits vorgestellten Strukturierungen die benötigten Elektrodenstrukturen einfach erstellt werden. Alternativ wurden Versuche durchgeführt, die NiP-Schicht mit galvanischer Kupferabscheidung anzukontaktieren. Verwendet wurden hierfür die gleichen Prozessschritte, die üblicherweise zur Durchkontaktierung von Leiterplatten mit Palladium-Bekeimung genutzt werden. Beispiele von auf diese Weise hergestellten elektrischen Anbindungen von NiP-Schichten sind in Abbildung 5-55 dargestellt. Die erfolgreiche Anbindung einer eingebetteten NiP-Schicht mittels Durchkontaktieren könnte später zum Beispiel genutzt werden, um Seitenkontaktierungen herzustellen.

Kontaktierung von NiP-Schichten

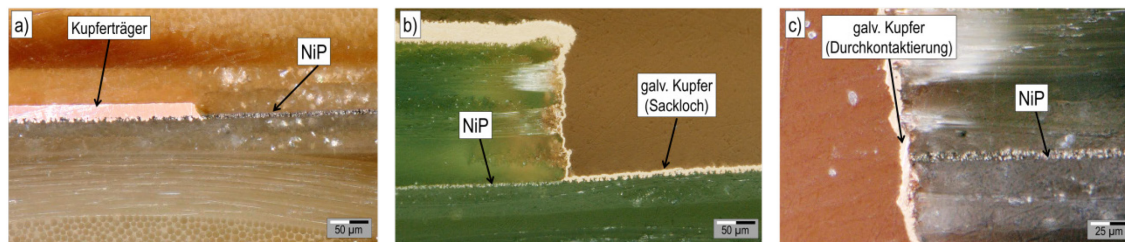


ABBILDUNG 5-55: QUERSCHLIFF AUFNAHMEN ELEKTRISCH ANKONTAKTIERTER NiP-SCHICHTEN; A) KUPFERELEKTRODE AUS TRÄGERKUPFER DER NiP-FOLIE; B) SACKLOCH MIT GALV. KUPFER AUF NiP-SCHICHT; C) ANKONTAKTIERUNG MIT DK DURCH NiP-SCHICHT

Als Ankontaktierungsmöglichkeiten für die Carbon/Polyimid-Folien wurden Versuche zur galvanischen Verkupferung, analog den NiP-Schichten, durchgeführt. Auch hier hat sich gezeigt, dass für eine Anhaftung der Kupferschichten eine Vorbehandlung der Folien notwendig ist. Durch die mechanische Erhöhung der Oberflächenrauigkeit konnten mittels Kupfergalvanik Elektroden auf der Carbon-Seite der Folie aufgebaut werden, die zum elektrischen Heizen verwendet werden konnten.

Kontaktierung von C/PI-Schichten

5.4.4 HAFTFESTIGKEIT DER HEIZSCHICHTEN AUF LEITERPLATTEN-SUBSTRATEN

Eine gute Haftfestigkeit der Heizschichten auf dem Substratmaterial (Leiterplatte) ist Grundvoraussetzung für einen zuverlässigen Einsatz. Schlechte Haftung auf Epoxid- oder Kupferflächen kann später Schwachstellen der eingebetteten Schicht in der Leiterplatte hervorrufen und somit Delaminationserscheinungen begünstigen. Prinzipiell wird hier zwischen der Haftung der Folien zum Prepreg-Material, da diese stets verpresst werden, und der Haftung der Gemische zum Laminat unterschieden. Nach [47] beruht die Haftung von polymeren Beschichtungsstoffen, wie den hier verwendeten Carbon-Gemischen, auf Kunststoff oder Metalloberflächen zumeist auf der Ausbildung von intermolekularen Wechselwirkungen (Van-der-Waals-Kräfte) zwischen dem Polymer des Beschichtungsstoffes und dem Substrat. Hinzu kommt die mechanische Adhäsion, die durch die natürliche Rauigkeit der Substratoberfläche bestimmt wird, die durch die flüssigen Anteile der Carbon-Gemische benetzt wird. Beim Trocknen und Aushärten der Schichten verzahnt sich die Beschichtung mit der rauen Oberfläche und bildet so einen Formschluss. Ein weiterer Adhäsionsmechanismus ist die Bildung von chemischen Bindungen an der Grenzfläche zwischen Beschichtungsstoff und Substrat. Laut [47] ist bei chemisch reaktiven Beschichtungsstoffen, dazu zählen auch die hier untersuchten Stoffe, mit der Ausbildung von Hauptvalenzen (ionische Bindung, kovalente Bindung) zu rechnen. Die Abbildung 5-56 zeigt den schematischen Querschnitt eines Beschichtungsfilm-Substrataufbaus mit den sich ergebenden Zonen der Haftung. Die Kohäsionszone beschreibt die innere Haftung, die durch die innere Struktur des

Haftfestigkeit allgemein

jeweiligen Stoffes bestimmt wird. Die Adhäsionszone besteht an der gemeinsamen Grenzfläche von Schicht und Substrat und wird von den bereits beschriebenen Mechanismen dominiert. Dazwischen bildet sich eine Übergangszone, die von wenigen Nanometern bis in Mikrometerbereiche reichen kann [47] und in der die physikalischen Eigenschaften des Beschichtungsstoffes von denen des Bulk-Materials abweichen können.

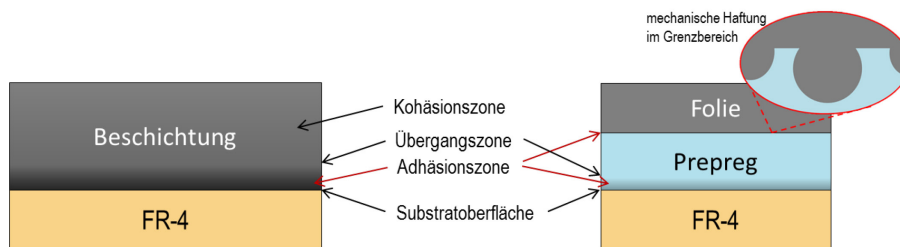


ABBILDUNG 5-56: SCHEMATISCHER QUERSCHNITT DURCH EINEN BESCHICHTUNGSFILM-SUBSTRAT-AUFBAU (LINKS) [47] UND EINEN FOLIE-PREPREG-SUBSTRAT-AUFBAU (RECHTS)

Die Adhäsionserscheinungen der NiP/Cu-Folie sind, wie bei reinen Kupferfolien (für Leiterplatten), durch die mechanische Haftung im Grenzbereich zum Prepreg geprägt. (Abbildung 5-56) Durch die raue Treatmentschicht kommt es beim Erweichen und Ver-netzen des Epoxidharzes zur mechanischen Verzahnung. Üblicherweise hat das Kupfertreatment eine Barrierschicht. Dadurch sind chemische Wechselwirkungen mit aktiven Gruppen im Epoxidharzsystem des FR-4 ausgeschlossen. [274] Hier bildet das Nickel-Phosphor-Material diese Barriere.

Haftung der
NiP-Folie

Die Polyimid-Carbon-Folie besitzt keine Treatmentschichten und hat zudem eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit. Auf Grund seiner hohen Glas-temperatur ist bei den hier verwendeten Laminier-Parametern, von dem Polyimid in Folie keine mechanische Verzahnung infolge plastischer Verformungen zu erwarten. Gleiches trifft für die chemischen Bindungen zwischen dem Epoxidharz des Prepregs und den Polyimidketten zu. Laut [275] besteht die Möglichkeit für solche Reaktion/Reaktionen. Diese treten jedoch nur unter speziellen Bedingungen, die hier nicht gegeben waren, auf.

Haftung der
C/PI-Folie

Zunächst wurde die qualitative Adhäsion der Materialien mittels Gitterschnitt überprüft. Die Vorgaben zur Anwendung finden sich in der ASTM D3359 [276] bzw. der DIN EN ISO 16276-2. Die applizierte Schicht wurde dafür in Abständen von 1 mm (am Rand 3 mm) gitterförmig zerschnitten. Dadurch wird die kohäsive Haftung der Schichten innerhalb der Schnitte unterbrochen und die Adhäsionsbereiche verkleinert. Auf den strukturierten Schichten wurde danach ein Klebeband mit einer Klebkraft von ca. $3 \frac{\text{N}}{\text{cm}}$ bis $4 \frac{\text{N}}{\text{cm}}$ aufgebracht und im Anschluss mit möglichst gleicher Geschwindigkeit und Richtung wieder abgezogen. (Abbildung 5-57)

Gitterschnittprüfung

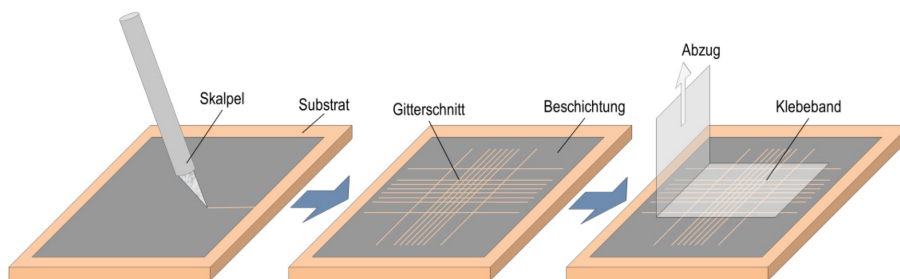


ABBILDUNG 5-57: PRINZIPIELLER ABLAUF DER HIER DURCHFÜHRTEN GITTERSCHNITTPRÜFUNG

Die Prüfungen wurden vorrangig auf den großflächigen Heizsegmenten des Drucktest-layouts (s. **Anhang F, d**) durchgeführt. Neben reinem FR-4-Untergrund fand auch eine Untersuchung von Kupfer und Bereichen mit vielen Übergängen zwischen FR-4 und Kupfer (Raster) statt. Für die Klassifizierung der Haftfestigkeit der Oberflächen nach ASTM D 3359 sind die Schichten vor und nach dem Abriss sowie das Klebeband mikroskopisch begutachtet worden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst.

Klassifizierung der
Heizschichten

TABELLE 5-6: QUALITATIVE KLASSIFIZIERUNG DER GITTERSCHNITTPRÜFUNG VERSCHIEDENER HEIZSCHICHTMATERIALIEN NACH ASTM D 3359 [276]

	FR-4	Kupfer	Kupfer/FR-4 Raster
CP-1	1	1	1
CP-2	2	2	2
CP-3	2	2	2
CP-5	2	2	2
NiP/Cu-Folie	4 - 5		
C/PI-Folie	0		
C/PI-Folie (angeraut)	1		

Die Klassifizierung erfolgt, wie in der Norm vorgegeben, anhand der prozentualen Beschichtungsfläche, die durch den Klebeabriss gelöst wurde. Die Schichten der Carbon-Gemische verhielten sich dabei sehr ähnlich. Das meiste Material wurde bereits beim Einschneiden in die spröden Schichten gelöst, wodurch (unabhängig vom Untergrund) die Klasse 2 (\triangleq 15 % bis 35 % entfernt) vergeben wurde. Bei CP-1-Schichten führte dies zu besonders viel abgeplatzt Material an den Kanten. Die Bewertung erfolgte nur mit Klasse 1 (\triangleq 35 % bis 65 % entfernt). Das geht mit der Beobachtung einher, dass an CP-1 verstärkt Kocherbildung auftrat, durch die eine verringerte Adhäsion in den Schnittbereichen der Schicht vermutet wird. An den NiP-Schichten konnte so gut wie keine Flächenreduktion festgestellt werden und Materialabtrag kann hier ausschließlich auf die plastische Deformation durch das Schneiden zurückgeführt werden. (Wertung: 4 – 5). Die Laminierversuche an der Carbon/Polyimid-Folie haben gezeigt, dass mit den Folien im Ausgangszustand keine ausreichende Haftung zwischen den

Presspartnern erreicht werden kann. Eine einfache mechanische Vorbehandlung der Oberfläche konnte die bewertbare Adhäsion verbessern. Somit war das Aufbauen von Proben für Versuche im Labormaßstab möglich. Für einen späteren Einsatz in der Multilayertechnik wird jedoch eine definierte Oberflächenvorbehandlung, wie sie z.B. in [277] oder [278] vorgestellt werden, empfohlen. In Abbildung 5-58 ist exemplarisch der Vergleich zwischen den Vorher/Nachher-Aufnahmen der Gitterschnitte an NiP- und an C/PI-Schichten auf FR-4-Material dargestellt.

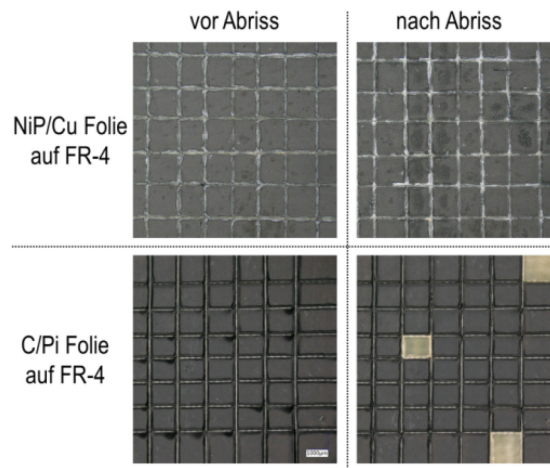


ABBILDUNG 5-58: BEISPIEL FÜR DAS ERGEBNIS DER GITTERSCHNITTPRÜFUNG AN AUFGEPRESSTEN FOLIENMATERIALIEN

Zusätzlich zur qualitativen Messung mittels Gitterschnitt wurden Scherversuche durchgeführt, in denen verschiedene Beschichtungsstoffe miteinander verglichen werden sollten. Die Grundlagen des Schertestes wurden bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert. Die hier durchgeführten Scherkraftmessungen wurden an dem in [279] beschriebenen Schertester durchgeführt. Das Messprinzip bei diesen Messungen ist ähnlich dem Abscheren von Bauelementen. Der Unterschied besteht darin, dass hier kein Lot die Verbindungsstelle bildet, sondern dass die jeweiligen Beschichtungsstoffe (Abbildung 5-59) auf Scherung beansprucht werden.

Scherkraftmessung
an Carbon-
Gemischen

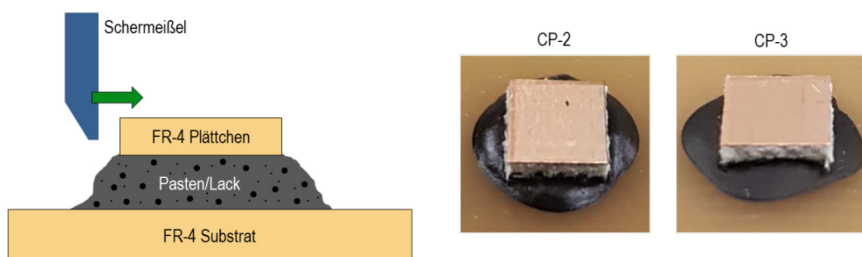


ABBILDUNG 5-59: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES SCHERTESTES VERSCHIEDENER BESCHICHTUNGSSOFFE (LINKS) UND BEISPIELE FÜR FR-4-PROBENKÖRPER (RECHTS)

Die hier verwendeten Proben bestehen aus FR-4-Probenkörpern mit den Abmessungen 5 mm x 5 mm x 1,5 mm. Das Grundsubstrat bildet eine größere Fläche aus FR-4. Für alle untersuchten Stoffe wurde sowohl die Anbindung auf reiner FR-4-Oberfläche als auch die Anbindung auf Kupferoberfläche untersucht. Beide Oberflächenvarianten sind für die spätere Applikation als Heizschicht relevant. Die Scherspannung ergibt sich aus dem Verhältnis der Scherkraft und der benetzten Probenkörperfläche ($\sim 0,25 \text{ cm}^2$). Das zu scherende Material wurde mittels manuellem Dispensieren in möglichst gleichen Mengen auf das Grundsubstrat aufgetragen und dient als Klebeschicht zu den darauf applizierten Probekörpern. Zunächst erfolgt ein Vergleich verschiedener Carbon-Gemische (CP-1 bis CP-5) miteinander. Anschließend wurden, auf die gleiche Weise, Vergleichsmessungen mit anderen Lack- und Klebesystemen durchgeführt, die Anwendung im Elektronikbereich finden. Alle Materialproben sind entsprechend ihrer vorgegebenen Trocknungs- und Härtungsparameter hergestellt worden. Die Ergebnisse der ermittelten Scherspannungen für die hier untersuchten Carbon-Gemische sind in Abbildung 5-60 dargestellt.

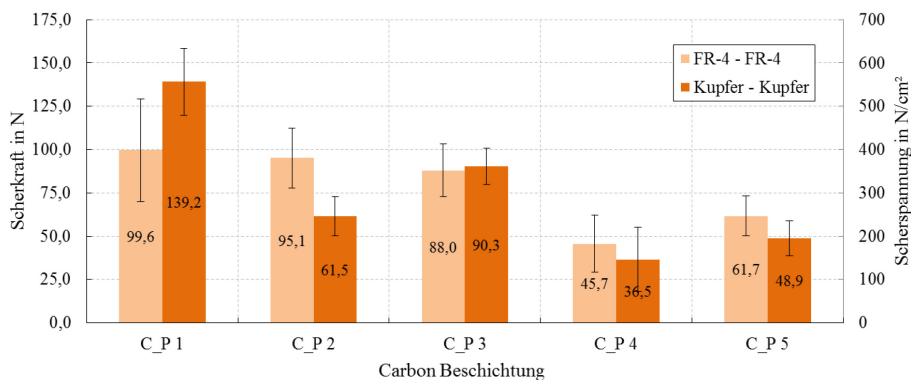


ABBILDUNG 5-60: MITTELWERTE DER GEMESSENEN SCHERKRÄFTE MIT STANDARDABWEICHUNG FÜR VERSCHIEDENE CARBON-GEMISCHE AUF 5 MM X 5 MM FR-4-PROBENKÖRPERN MIT UND OHNE KUPFERBESCHICHTUNG

Die gemessenen Scherspannungen reichen von maximal $556,8 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$ an CP-1 auf Cu-Oberfläche bis zu minimal $146,1 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$ an CP-4 auf Cu-Oberfläche. Eine deutliche Abhängigkeit von der jeweiligen Oberfläche scheint nicht vorzuliegen. Die Betrachtung der Bruchbilder (Abbildung 5-62) bestätigt dies. Bei fast allen Stoffen (Ausnahme: CP-4) lässt sich ein Kohäsionsbruch erkennen, also ein Bruch innerhalb der Beschichtung, nämlich in den Bereichen, in denen die Bindungskräfte am geringsten sind. REM-Aufnahmen an Proben mit CP-4-Schichten haben wiederholt Spalte bzw. Risse zwischen Substratoberfläche und Schicht gezeigt (s. Abbildung 5-61). Dies deutet auf geringe Adhäsion in diesen Bereichen hin.

Gemessene
Scherspannungen

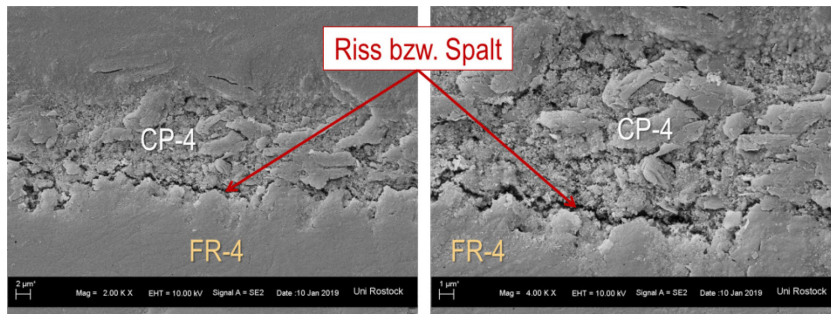


ABBILDUNG 5-61: REM-AUFNAHMEN EINES QUERSCHLIFF MIT BEREICHEN SCHLECHTER ADHÄSION ZWISCHEN FR-4-OBERFLÄCHE UND CP-4-SCHICHT

Häufig konnten in den Bruchflächen der verschiedenen Proben kocher-ähnliche Bereiche identifiziert werden. Dies wird auf Lösemiteileinschlüsse zurückgeführt, die in dickeren Schichten zurückblieben. Da diese vorrangig und in besonderer Größe an CP-1 und zu Teilen an CP-2-Proben auftraten, kann angenommen werden, dass die Scherfestigkeiten von dünneren Schichten über den hier gemessenen Werten liegen.

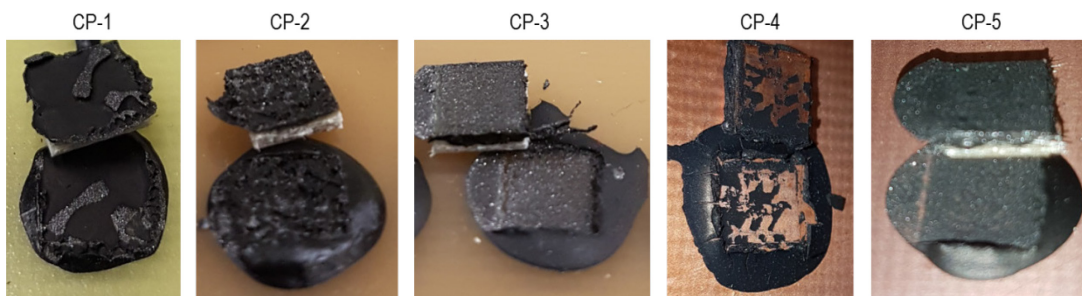


ABBILDUNG 5-62: TYPISCHE BRUCHBILDER DER ABGESCHERTEN CARBON-GEMISCHE

Mit Ausnahme von CP-4 ist von allen Stoffen bekannt, dass der Füllgrad mit aktiven Füllstoffen sehr hoch ist. Möglicherweise ist auch hierdurch die kohäsive Festigkeit negativ beeinflusst worden. Eine direkte Vergleichsmessung mit dem Lacksystem von CP-2 ohne aktive Füllstoffe ist in Abbildung 5-63 dargestellt. In dieser ist zu erkennen, dass die Scherkräfte im Mittel etwas höher liegen als im gefüllten Material (in Abbildung 5-62). Analog verhält es sich mit einer weniger gefüllten Variante von CP-3.

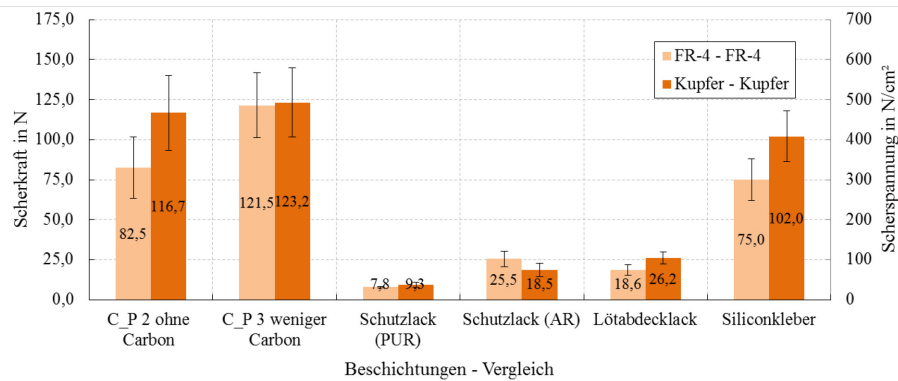


ABBILDUNG 5-63: MITTELWERTE DER GEMESSENEN SCHERKRÄFTE MIT STANDARDABWEICHUNG FÜR VERSCHIEDENE LACKSYSTEME AUF 5 MM X 5 MM FR-4-PROBENKÖRPERN MIT UND OHNE KUPFERBESCHICHTUNG

5.5 THERMISCHE UND ELEKTRISCHE ABHÄNGIGKEITEN DER HEIZSCHICHTPARAMETER

Die Kenntnisse über die thermischen und elektrischen Eigenschaften der Heizschichten sind sowohl für die durchgeführten Untersuchungen als auch für eine spätere Anwendung der Schichten notwendig. Neben den passiven Messungen, die in Kapitel 6.1 vorgestellt werden, wurden hierfür eine Reihe von Analysen an aktiv beheizten Proben durchgeführt. Die zeitabhängige Aufnahme der elektrischen Parameter (Strom, Spannung) erfolgt dabei in der Regel über eine LabVIEW-Software. Die lokalen Temperaturmessungen wurden mit Drahtthermoelementen (Typ-K) [280] und entsprechenden Datenloggern [281], [282] durchgeführt. Da bei diesen eine elektrische Thermospannung infolge des Seebeck-Effektes [125] gemessen wird, dürfen die Sensorspitzen nicht in elektrischen Kontakt mit aktiv beheizten Strukturen kommen. Bei der Vermessung solcher Schichten werden die Thermoelemente deshalb mit einer zusätzlichen Schicht Polyimidband ($d \approx 70 \mu\text{m}$) zwischen stromführender Struktur und Messspitze versehen. Dies führt zu einer geringen Temperaturdifferenz zwischen lokaler Heizschichttemperatur und gemessener Temperatur. Außerdem kann es bei weniger rauen Heizschichtenoberflächen (C/PI-Folie und CP-1-Schablonendruck) dazu kommen, dass die Klebeschicht des Polyimid bei höheren Temperaturen ($> 180^\circ\text{C}$) nicht mehr vollständig anhaftet. Dadurch bilden sich isolierende Luftschichten unter dem PI-Band und damit dem Sensor, die das Messergebnis merklich verfälschen. Für globale Messungen der Temperatur und deren Verteilung wurden zusätzlich IR-Kameras [283], [284] verwendet. Für eine möglichst korrekte Messung ist die Kenntnis der Emissionskoeffizienten der verschiedenen Oberflächen erforderlich. Neben Literaturwerten wurde sich hierbei auf experimentell ermittelte Werte durch Vergleichsmessungen gestützt. (Tabelle 5-7)

Messinstrumente und Durchführung

TABELLE 5-7: EXPERIMENTELL ERMITTELTE EMISSIONSKOEFFIZIENTEN EINIGER HEIZSCHICHTEN

Oberfläche	Emissionsgrad ϵ
CP-2 (ausgehärtet)	0,85 – 0,87
CP-3 (ausgehärtet)	0,78 - 0,8
NiP – Folie	0,74 – 0,76
C/PI – Folie	0,86 – 0,88

Grundlegend sind für die Durchführung dieser Versuche (wenn möglich) Heizschichten verwendet worden, bei deren Applikation eine hinreichend homogene Schicht aufgetragen werden konnte und deren visuelle Inspektion vor der Messung keine Defekte oder lokale Fehlstellen aufgezeigt hat. Bei den untersuchten Proben wurden die Heizschichten jeweils auf FR-4-Basismaterialien appliziert und mit entsprechenden Kupferelektroden versehen. Es wurden sowohl freiliegende Schichten als auch zwischen zwei FR-4-Lagen eingebettete Strukturen untersucht. Von Interesse ist hierbei vor allem die Veränderung des elektrischen Schichtwiderstandes infolge des Heizprozesses. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Versuche sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

Verlauf der elektrischen Parameter

Zu Referenzzwecken wurden auch hergestellte Kupferheizwendeln vermessen. Eine exemplarische Messung hierzu findet sich in **Anhang I**. Die Messung verdeutlicht den Einfluss der ungleichmäßigen Temperaturverteilung, verursacht durch konvektive Randeffekte und die geringe Wärmeleitfähigkeit der FR-4-Substrate, auf den Betrag der gemessenen Temperaturkoeffizienten. Sie zeigt den erwarteten linearen Verlauf des Widerstandes bei der Eigenerwärmung des Kupfers und einen abgeleiteten Temperaturkoeffizienten von ca. $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$. Dieser ist damit etwas geringer als der theoretische α -Wert für Kupfer. (s. Tabelle 2-6)

Metallische Heizstrukturen - Kupfer

Die Änderung des Schichtwiderstandes von NiP-Heizelementen ist bereits in Abschnitt 5.3.2.2 während des Einlaminierens der Folien beobachtet worden. Der dort aufgetretene irreversible Widerstandesabfall, hinter dem eine Kristallisierung der Mikrostruktur vermutet wird, konnte auch bei den aktiven Heizprozessen an freiliegenden Strukturen festgestellt werden. Im linken Diagramm von Abbildung 5-64 wird dieser Effekt beim ersten Aufheizen einer freiliegenden Struktur beobachtet, die zu dem Zeitpunkt bereits einen Pressprozess zum Auflaminieren der NiP/Kupfer-Folie erfahren hat. Die irreversible Widerstandsverringerung beträgt zwischen 30 % bis 40 % und ist somit geringer als die beim Laminieren gemessene Änderung (40 % bis 50 %). Dies legt nahe, dass die Abnahme mit längeren Heizzeiten (hier: < 10 min) zunimmt. Beim zweiten Aufheizvorgang lässt sich zudem andeutungsweise eine Fortsetzung des Kristallisations-Effektes messen, sobald die Höchsttemperatur des ersten Durchganges überschritten

Metallische Heizstrukturen – NiP-Folie

wird. Für den zweiten Heizvorgang lässt sich (wie auch bei den Abkühlkurven) ein annähernd lineares PTC-Verhalten feststellen.

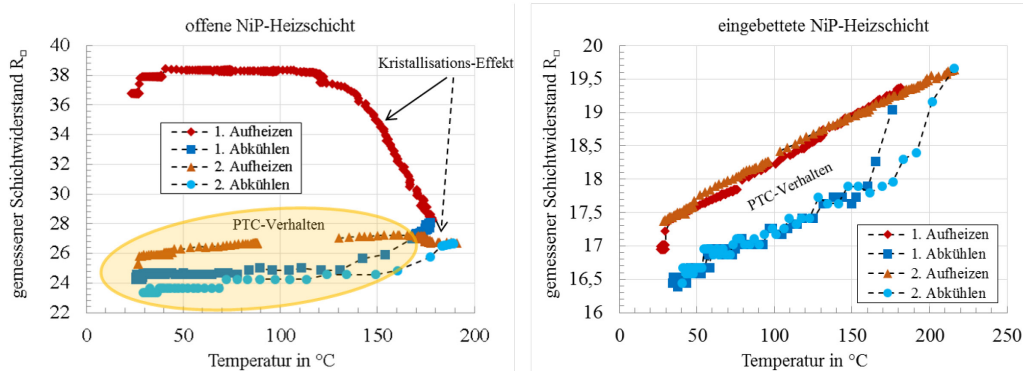


ABBILDUNG 5-64: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON NiP-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)

Noch deutlicher ist der positive Temperaturkoeffizient bei den eingebetteten Heizstrukturen zu erkennen. (Abbildung 5-64 rechts) Ein überlagerter ‚NTC-Einfluss‘ durch Kristallisation war hier nicht mehr zu erfassen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Proben nach dem Strukturieren des Kupfers (Trägermaterial) und dem Freilegen der NiP-Heizstruktur einen weiteren Pressprozess zu durchlaufen haben. Der Kristallisationseffekt scheint durch diesen Prozess abgeschlossen zu sein. Dies lässt sich auch an den deutlich geringeren Ausgangswiderstandswerten der eingebetteten Strukturen im Vergleich zu den offenen Strukturen (bei gleicher Heizschicht-Geometrie) festmachen. Das Aufheizverhalten im eingebetteten Zustand ist nach einer mehrfachen Wiederholung der Versuche nahezu identisch. Die Abweichungen zwischen Aufheiz- und Abkühlkurven sind hier auf den Messaufbau und die externe Temperaturmessung zurückzuführen. Anhand der gemessenen Kurven lässt sich nach (Gl. 2-6) an den eingebetteten Schichten ein positiver Temperaturkoeffizient von ca. $\alpha_{NiP} = 6,87 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} (\pm 8 \%)$ berechnen.

Die Widerstandsmessungen beim Einlaminieren der C/PI-Folie (s. 5.3.3) waren nur bedingt aussagefähig, da mehrere Einflussfaktoren das Messergebnis überlagerten. Etwas genauer gelang die Messung beim aktiven Heizen mit den Schichten. Die Messwerte an einer freiliegenden, sowie einer eingebetteten Schicht, sind der Abbildung 5-65 zu entnehmen.

Carbon Heizschicht –
C/PI-Folie

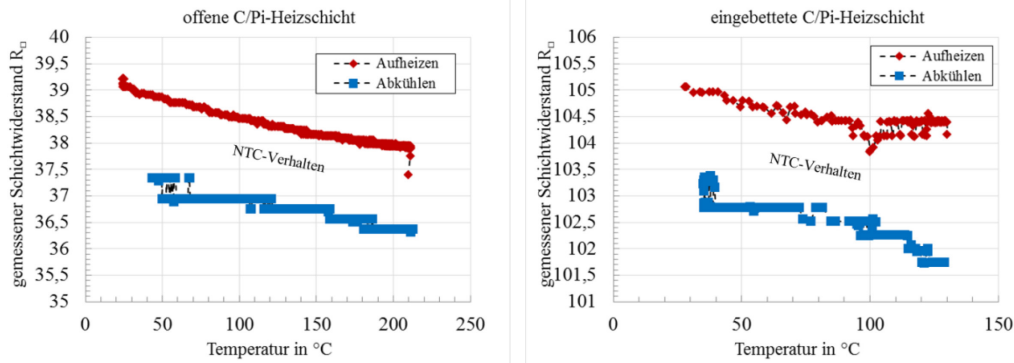


ABBILDUNG 5-65: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CARBON/POLYIMID-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)

In beiden Fällen zeigt sich ein beinahe lineares NTC-Verhalten, welches so über mehrere Messungen reproduziert werden konnte. Ein ähnlich linearer, negativer Temperaturkoeffizient konnte an Carbon-Black-Partikeln als Füllstoff in einer PVC-Polymermatrix in [285] und in einer Silikonmatrix in [286] beobachtet werden. Die Autoren von [286] beschreiben zudem den Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Füllkonzentration des Carbon-Blacks im Polymerstoff. So lässt sich ein NTC-Verhalten vorrangig an kleineren Partikeln ($< 20 \text{ nm}$) und geringen Füllgraden (5 % bis 20 %) beobachten. Der aus den Messungen abgeleitete negative Temperaturkoeffizient (im Bereich ca. 25 °C bis 200 °C) für die freiliegende C/PI-Folie beträgt etwa $\alpha_{C/PI} = -1,79 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} (\pm 5 \%)$ und für die eingebettete Schicht (im Bereich 25 °C bis 110 °C) ca. $\alpha_{C/PI} = -1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} (\pm 10 \%)$.

Die Widerstandsverläufe der Carbon-Gemische sind in hohem Maße von der jeweiligen Polymermatrix abhängig. Hinzu kommen weitere Faktoren, wie z.B. Feuchtebelastung der Schicht, Qualität der Aushärtung und etwaige Vorbelastungen. Mit diesen Faktoren hat es sich als äußerst schwierig erwiesen, ein reproduzierbares Verhalten an den unterschiedlichen, gedruckten Heizschichten zu erhalten. Während der In-situ-Messungen beim Einbetten (s. Abschnitt 5.4.2) konnte bereits gezeigt werden, dass teilweise große Schwankungen des Widerstandswertes zu beobachten waren. Im Folgenden soll dies am Beispiel von aktiven Heizversuchen verschiedener CP-Schichten weiter diskutiert werden. In den Diagrammen von Abbildung 5-66 sind aktive Messungen für siebgedruckte CP-3-Schichten dargestellt. Das Widerstandsverhalten dieser Heizschichten ist ein gutes Beispiel für die irregulären Widerstandsverläufe sowie deren mangelnde Reproduzierbarkeit.

Carbon Heizschicht –
C/Polymer-Schichten

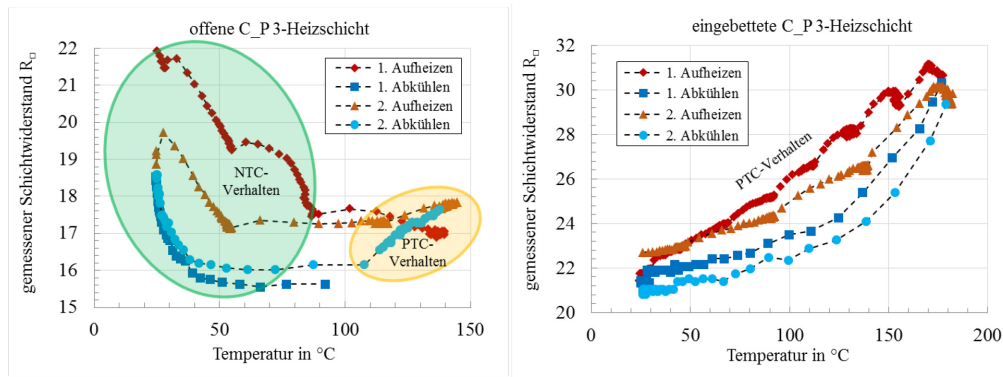


ABBILDUNG 5-66: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-3-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)

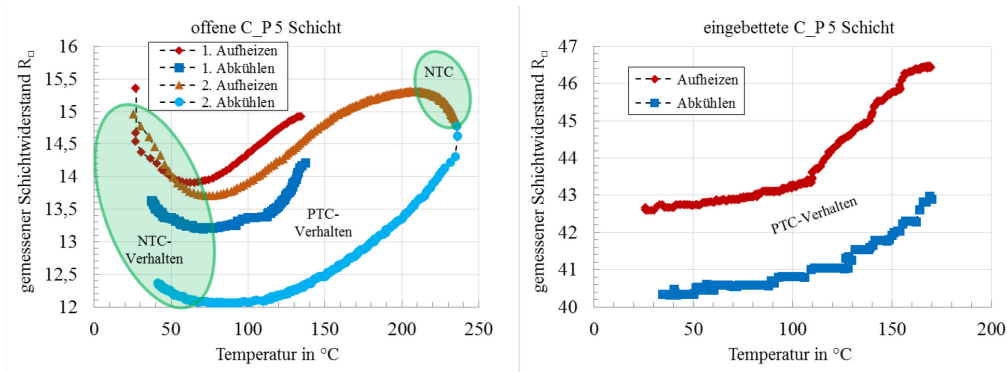


ABBILDUNG 5-67: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-5-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)

Bei den Materialien CP-3 und CP-5 lässt sich zu Beginn des Aufheizvorganges (für freiliegende Schichten) zunächst ein Widerstandsabfall (NTC-Verhalten) beobachten. Dieser Effekt deutet auch hier auf die (Neu-)Bildung leitfähiger Pfade zwischen den Carbon-Partikeln hin. Entgegen dem NTC-Verhalten bei höheren Temperaturen wird in diesem Fall noch kein Erweichen der Polymermatrix als Ursache gesehen. Stattdessen wird ein Feuchteinfluss vermutet. Von den Systemen CP-3 und CP-5 ist bereits bekannt, dass in diesen wässrige Lösungsmittel verwendet werden. Kommen die applizierten Schichten in Kontakt mit der umgebenden Luftfeuchtigkeit, lagern sich Wassermoleküle in der Schicht an. Dies bewirkt ein Anschwellen der Polymermatrix. Dadurch driften die Carbon-Partikel auseinander und die Anzahl der leitfähigen Pfade nimmt ab. Nach [287] und [288] ist dieser Effekt in mit Carbon-Black gefüllten Polymerwerkstoffen besonders ausgeprägt. Beim Aufheizen wird die Schicht getrocknet und die Wassermoleküle verlassen die Polymermatrix. Dadurch driften die leitfähigen Partikel wieder zusammen und die elektrische Leitfähigkeit steigt (NTC). An eingebetteten Proben kann dieser mutmaßliche Feuchteinfluss zunächst nicht beobachtet werden und wird auf die schützende Wirkung der umgebenden FR-4 und Prepreg-Lagen zurückgeführt. Das gemessene PTC-Verhalten der Schichten wird auch hier auf

eine thermische Expansion der jeweiligen Polymermatrizen, die die thermische Bewegung der Füllstoffe im erweichten Polymer überlagern, zurückgeführt. Ein identisches Verhalten konnte in [270] beobachtet werden. Außerdem wird hier ein Wert für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Carbon-Black mit $\alpha_{cte} \sim 7 - 8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ angegeben.

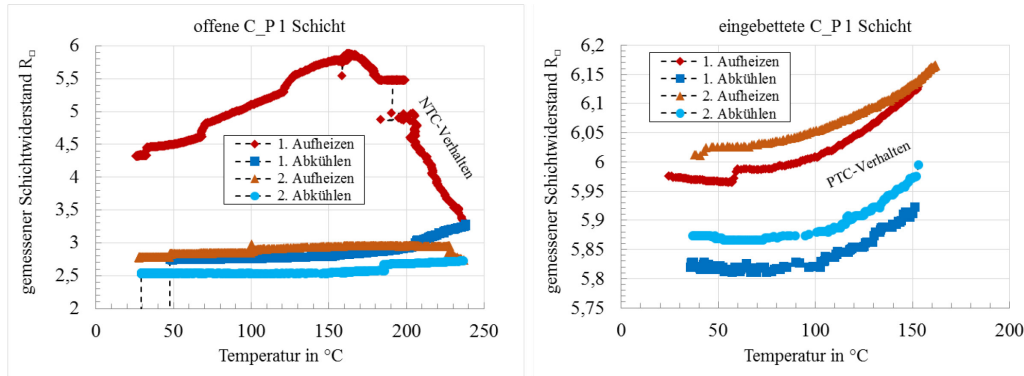


ABBILDUNG 5-68: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-1-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)

Mit den eingebetteten Schichten CP-1 (Abbildung 5-68), CP-3 und CP-5 kann vorrangig ein PTC-Verhalten des Schichtwiderstandes gemessen werden. Dieses zeigt jedoch keinen linearen Verlauf. Stattdessen deutet sich ein exponentieller Anstieg bis zum Erreichen eines Widerstandsmaximums an. In Abschnitt 5.4.2 wurde das bereits diskutiert. Bei den meisten Proben wurde die Messung an diesem Punkt abgebrochen, da es hier häufig zur Schädigung der Proben durch Delamination zwischen den verpressten Lagen kam (mehr dazu im folgenden Kapitel). Eine Delaminationserscheinung ist in den Messwerten von CP-2 (Abbildung 5-69 - rechts) zu erkennen. Der Widerstandssprung beim ersten Aufheizvorgang ist analog zu einer lokalen Delamination ($\sim 1 \text{ cm}^2$). Die Begutachtungen solcher Schäden zeigten, dass hierbei Kohäsionsbrüche in der Heizschicht stattfinden. Zurückzuführen ist dies auf eine höhere Adhäsion der Carbon-Schicht zum Substrat und zum Prepreg und entspricht den Ergebnissen zur Haftfestigkeit (Abschnitt 5.4.4.).

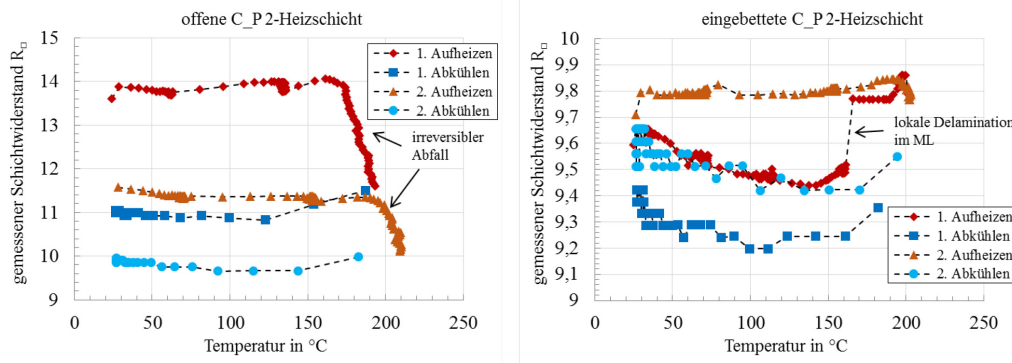


ABBILDUNG 5-69: ÄNDERUNG DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES VON CP-2-HEIZSCHICHTEN BEIM AKTIVEN HEIZEN; GEMESSEN AN FREILIEGENDER SCHICHT (LINKS) UND AN EINGEBETTETER SCHICHT (RECHTS)

Insgesamt zeigen die Heizversuche ein Widerstandsverhalten der jeweiligen Schichten, das vor allem von der jeweiligen Polymermatrix abhängig ist. Für CP-1 und CP-2 ist der genaue Polymerstoff nicht bekannt, aber aus den Messungen kann die Vermutung abgeleitet werden, dass die Glasübergänge beider Systeme zwischen 150 °C und 200 °C liegen. Diese Materialien zeigen zudem einen „Einbrenneffekt“, durch den ein erstes Überschreiten der jeweiligen Glasübergangstemperatur den Widerstand dauerhaft senkt. Ein wiederholtes Aufheizen verursachte deutlich kleinere Änderungen im Schichtwiderstand. Dieser Effekt wurde auch in [270] bei vergleichbaren Messungen beobachtet und wird hier als elektrische Hysterese bezeichnet. In mehreren Heizschritten konnte in [270] ein Altern des Polymerstoffes durch zunehmende Oxidation der Polymerketten nachgewiesen werden. Eingebettete Proben zeigen diesen „Einbrenneffekt“ hier nicht mehr, da er bereits beim Laminieren stattgefunden hat.

Im Folgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse zur Temperaturverteilung an endogen beheizten Leiterplatten, die über eine Vielzahl von Heizversuchen gesammelt wurden, kurz dargestellt werden. Die sich ergebende Temperaturverteilung an den Proben ist von vielen Faktoren, wie z.B. Leiterplattengeometrie, Heizschichtgeometrie, Elektrodengeometrie, Mehrlagenaufbau, Kupferstruktur auf den Außen- und Innenlagen sowie Heizzeiten, abhängig. Als wichtigste Einflussfaktoren werden aber die Homogenität (Schichtdicke, Partikelverteilung) der applizierten Heizschicht sowie die Qualität des Pressprozesses (eingebettete Schichten) beobachtet. Die gleichmäßigste Applikation gelingt mit den Folien, deren Schichtdicke bereits vorgegeben ist. Für die Applikation der Carbon-Gemische wurde der Siebdruck als das geeignetste Verfahren genutzt. Aber auch in diesem gelingt es aus verschiedenen Gründen nicht, eine ideal homogene Schicht über die hier untersuchten, großen Flächen aufzutragen. Somit treten bereits Auswirkungen auf die lokalen Stromdichten und die Temperaturverteilung auf. Auch der Pressprozess im Labor ist als toleranzbehaftet einzustufen. Lokale Druck- und Temperaturunterschiede beim Prozess sowie Lufteinschlüsse in den Prepreg-

Temperaturverteilung
an beheizten Proben

schichten können weitere Temperaturgradienten auf den beheizten Proben zur Folge haben. An den folgenden Beispielen soll die Temperaturverteilung an den Proben dargestellt werden.

Mit den Heizschichten, welche aus der NiP-Folie gefertigt wurden, waren insgesamt gleichmäßigere Temperaturverteilungen zu erzielen als mit den gedruckten Schichten. Gleiches gilt für die Carbon/Polyimid-Folie, die aber auf Grund des erhöhten Fertigungsaufwandes und eines, für großflächiges Heizen ungeeigneten, Flächenwiderstandes nicht im Fokus dieser Untersuchung standen. In Abbildung 5-70 ist die Erwärmung an einer NiP-Heizschicht über vier serielle Heizsegmente dargestellt. Die beheizte Fläche in der Probe ist ca. 85 mm x 95 mm groß und die Substratstärke beträgt 1,5 mm. Die Heizfläche wurde segmentiert, um für spätere Anwendungen die Voraussetzung zu schaffen, einzelne Bereiche (mit weniger Leistungsbedarf) erwärmen zu können. Bei Ansteuerung der äußeren Elektroden (links und rechts) findet in der NiP-Schicht unter den drei mittleren Kupferelektroden nur eine vernachlässigbare Joulesche Erwärmung statt, da hier die Stromdichte durch das besser leitende Kupfer geführt wird. Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit der Leiterzüge wird die Wärme hier zwar schneller verteilt, dennoch bleibt der wärmesenkende Einfluss an diesen Stellen sowie an der externen Kontaktierung messbar. Dies lässt sich auch an dem x-y-Temperaturprofil der freilegenden NiP-Schicht in **Anhang J** erkennen. Der Grafik kann entnommen werden, dass auch innerhalb der Heizsegmente keine homogene Temperaturverteilung auftritt. Einen großen Anteil daran haben thermische Verluste an den nichtbeheizten Rändern sowie an der ungleichmäßigen Anordnung von Kupferstrukturen der Probe. Dies wurde bereits in den theoretischen Vorbetrachtungen von Abschnitt 3.2 diskutiert. Somit ergeben sich messbare Temperaturunterschiede in jedem Segment von 30 K bis 50 K. Mit der Histogrammanalyse der Temperaturen innerhalb jedes Segmentes (Abbildung 5-70 rechts) sollen diese Unterschiede verdeutlicht werden.

Temperaturverteilung
auf beheizten
NiP-Schichten

konnte. Dies wird nicht nur auf die unvermeidbaren Randeffekte, sondern auch auf toleranzbehaftete Herstellungsprozesse im Labor zurückgeführt.

In Abbildung 5-72 ist ein Beispiel für eine Probe mit eingebetteter NiP-Schicht auf einem 1,5 mm dicken FR-4-Träger und unter einer 0,1 mm dicken FR-4-Lage dargestellt. Um neben der IR-Aufnahme und dem x-y-T-Profil (s. **Anhang J**) die Temperaturverteilung besser quantifizieren zu können, wurden ausgehend vom Mittelpunkt der Probe, konzentrische Quadrate im IR-Bild vermessen. Die Darstellung der gemessenen Temperaturpixel im Histogramm erfolgt kumulativ. Innerhalb des 50 mm² Quadrates wurden nur die Bereiche, unter denen sich eine aktive Heizschicht befindet, vermessen.

Temperaturverteilung
mit eingebetteten
NiP-Schichten

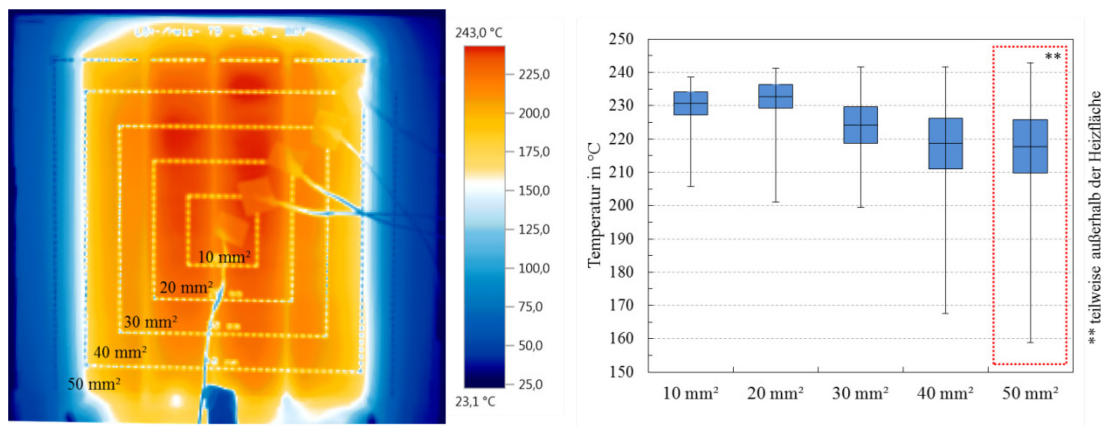


ABBILDUNG 5-72: TEMPERATURVERTEILUNG EINER EINGEBETTETEN NiP-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME VON DER 0,1 MM SEITE (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER TEMPERATUREN IN KONZENTRISCHEN, QUADRATISCHEN FLÄCHEN - KUMULATIV (RECHTS)

Ähnlich wie bei den freiliegenden Schichten treten auch bei den eingebetteten Proben Abweichungen in der Temperaturverteilung auf. Da für das Einbetten ein weiterer Laminierprozess notwendig ist, kann es zu weiteren Abweichungen infolge prozessbedingter Fehler kommen.

Bei den eingebetteten Carbon-Schichten kommen zu den genannten Einflussfaktoren lokale Schichtdickenschwankungen, welche auf den toleranzbehafteten Siebdruckprozess zurückzuführen sind, hinzu. Dementsprechend zeigte sich bei diesen Heizschichten eine höhere Varianz in der Probenqualität mit Hinblick auf die Temperaturverteilung. Entsprechend dieser Vorgabe findet sich in Abbildung 5-73 ein Beispiel für eine qualitativ bessere Probe. Zu erkennen ist die Erwärmung einer CP-2-Schicht, die zwischen zwei 0,25 mm dicken FR-4-Lagen eingebettet wurde. Die etwas gleichmäßigere Erwärmung über die Fläche (**Anhang J**) ist auf die geringere thermische Masse des umgebenden FR-4 zurückzuführen.

Eingebettete Carbon-
Schichten
(Siebdruck)

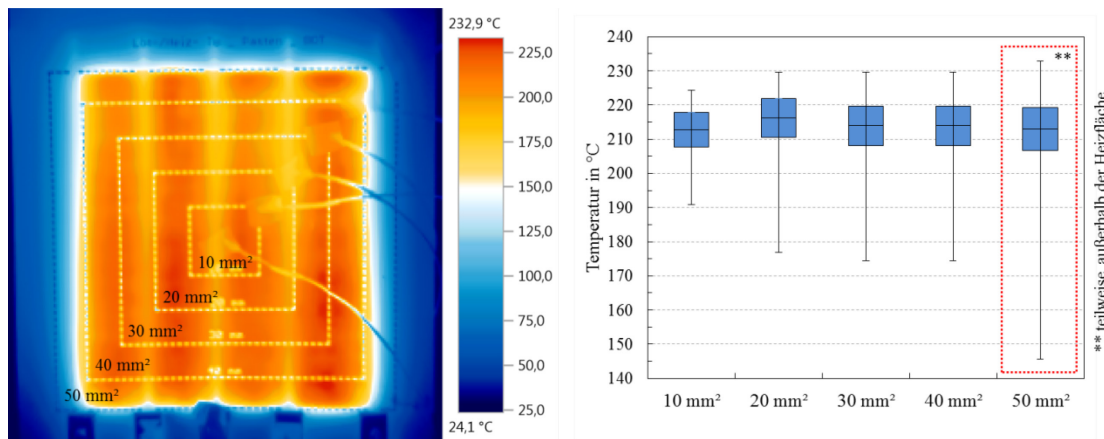


ABBILDUNG 5-73: TEMPERATURVERTEILUNG EINER EINGEBETTETEN CP-2-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER TEMPERATUREN IN KONZENTRISCHEN, QUADRATISCHEN FLÄCHEN - KUMULATIV (RECHTS)

Mit CP-2 und CP-1 ließen sich tendenziell reproduzierbarere Proben herstellen als mit den Gemischen CP-3 und CP-5. In Abbildung 5-74 ist das Beispiel einer ungenügenden Probe mit eingebetteter CP-3-Heizschicht dargestellt. Die IR-Aufnahme und das Temperaturprofil (**Anhang J**) zeigen eine sehr irreguläre Temperaturverteilung.

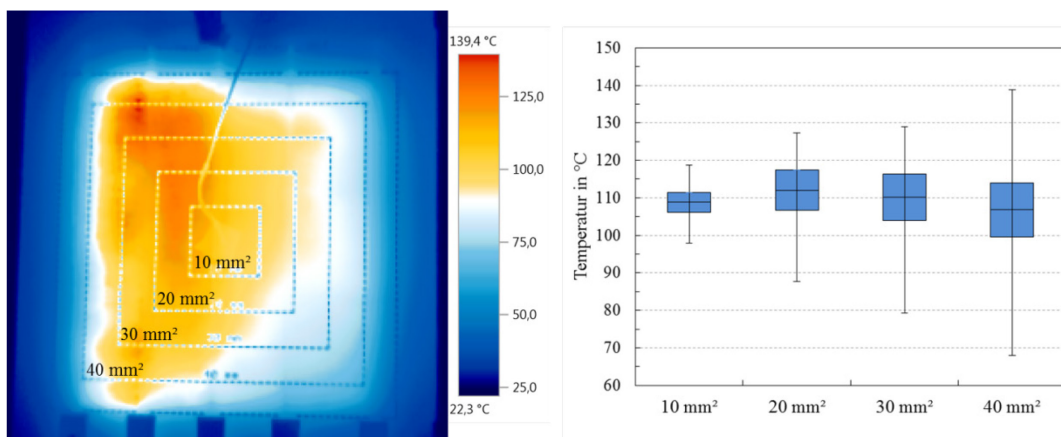


ABBILDUNG 5-74: TEMPERATURVERTEILUNG EINER EINGEBETTETEN CP-3-HEIZSCHICHT; IR-AUFNAHME VON 0,1 mm SEITE (LINKS); HISTOGRAMMANALYSE DER TEMPERATUREN IN KONZENTRISCHEN, QUADRATISCHEN FLÄCHEN - KUMULATIV (RECHTS)

Die Unregelmäßigkeit in der Schichtdickenverteilung kann für CP-3 auf dessen niedrige Viskosität und das schnelle Austrocknen beim Siebdruckprozess zurückgeführt werden. Derartige Abweichungen in der Schicht erlauben keinen sinnvollen Einsatz für Heizprozesse.

Bei den thermischen Messungen ist außerdem aufgefallen, dass es auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von FR-4 in dünnen Laminaten kaum zur lateralen Verteilung der Temperatur in kältere bzw. unbeheizte Bereiche kommt. Somit endet die effektiv beheizbare Fläche mit dem Ende der eingebetteten Heizschicht. In Abbildung 5-75 (rechts) ist eine Messung der Temperaturdifferenz neben der effektiven Heizflä-

Temperaturverteilung
im FR-4

che (Abstand: 5 mm) in Abhängigkeit von der mittleren Heizflächentemperatur dargestellt. In dem linken Diagramm von Abbildung 5-75 ist die Messung der horizontalen Temperaturunterschiede zwischen Top- und Bottom-Seite in der beheizten Fläche ersichtlich. Die Darstellung ist in Abhängigkeit von der höheren Temperatur, die auf einer 0,1 mm dicken FR-4-Lage gemessen wurde, dargestellt. Die Verteilung ergibt sich aus der stufenweisen Leistungserhöhung beim Heizvorgang. Zu Beginn der Aufheizphase jeder Leistungsstufe (mit ca. 0,5 K/s) sind die absoluten Unterschiede größer im Vergleich zum Annähern des Systems gegen Stufenende an einen stationären Zustand. Die Temperaturdifferenz zwischen 0,1 mm Top- und 1,5 mm Bottom-Seite wächst auf bis zu 20 K bei einer Heiztemperatur von ca. 250 °C an. Die Messdaten bestätigen somit die in Abschnitt 3.2.1 modellierten Ergebnisse.

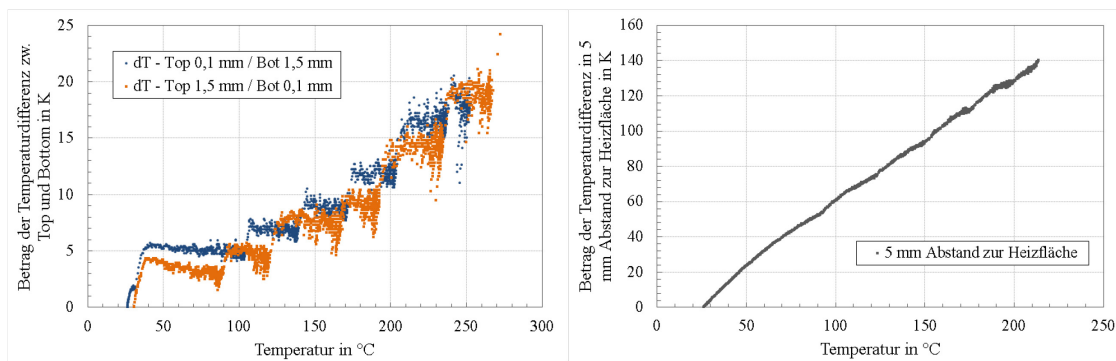


ABBILDUNG 5-75: HORIZONTALE TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN TOP- UND BOTTOM-SEITE EINER BEHEIZTEN PROBE (LINKS); LATERALE TEMPERATURDIFFERENZ IM ABSTAND VON 5 MM ZUR HEIZFLÄCHE (RECHTS)

Auf den Einfluss von Fehlstellen im Substrat und der Heizschicht in Form von Bohrlöchern soll nur kurz eingegangen werden. Die meisten Leiterplatten (vor allem Multilayer) benötigen Durchbrüche in der z-Achse zur Montage (Bohrlöcher) oder zur elektrischen Verdrahtung (z.B. Durchkontaktierungen). Durch eine vollflächige Heizschicht in einer Zwischenlage werden die Freiheitsgrade in z-Richtung eingeschränkt. Im Gegensatz zu schmalen Heizwendeln oder Heizdrähten bleibt die grundlegende Funktion der hier behandelten Heizschichten, auch bei lokal begrenzten Unterbrechungen, bestehen. Am folgenden Beispiel soll kurz der qualitative Einfluss von einer bzw. mehreren Bohrungen durch die Heizschicht gezeigt werden. Der Abbildung 5-76 ist der Einfluss auf die Temperaturverteilung einer nahezu homogenen Heizschicht durch eine bzw. mehrere Bohrungen zu entnehmen. Um die Unterschiede in IR-Aufnahmen besser auflösen zu können, wurden vergleichsweise große Bohrungen mit $d = 1$ mm gewählt.

Einfluss von Fehlstellen in der Heizschicht

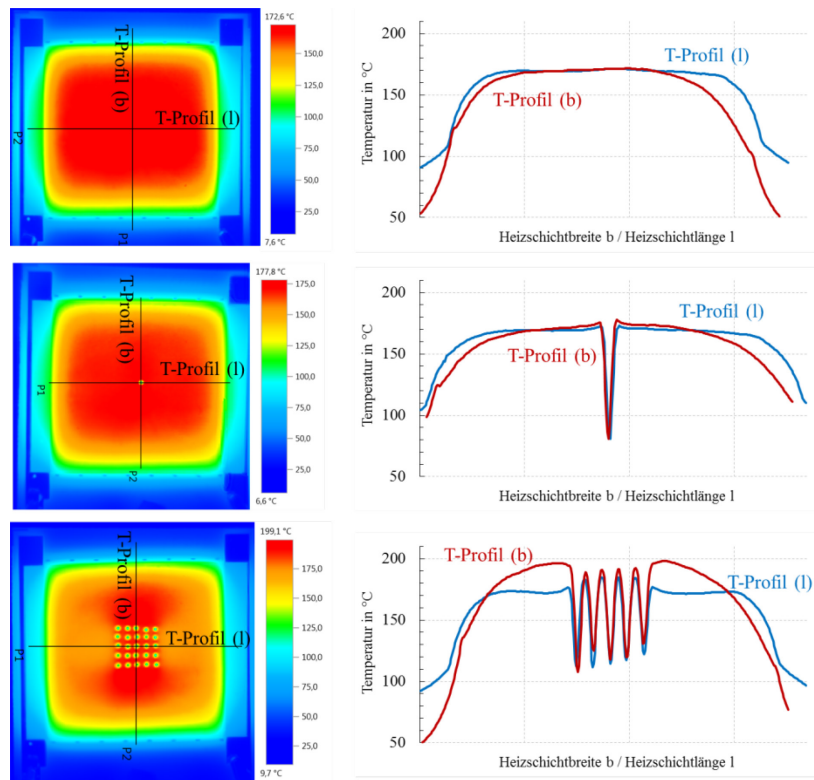


ABBILDUNG 5-76: IR-AUFNAHMEN UND TEMPERATURPROFILE ÜBER DIE FLÄCHE EINER HEIZSCHICHT (CP-2) MIT: KEINER FEHLSTELLE (OBEN); 1 BOHRUNG ALS FEHLSTELLE (MITTE); 25 BOHRUNGEN ALS FEHLSTELLE (UNTEN)

Durch die lokale Unterbrechung der Schicht, in Form von Bohrlöchern, verlagert sich die Stromdichte auf die nicht-unterbrochenen Bereiche zwischen den Elektroden. Als Folge werden diese Bereiche heißer als die Bereiche vor und hinter der Fehlstelle. Dies lässt sich am deutlichsten in Abbildung 5-76 (unten) mit einer Matrix aus 5 x 5 Bohrungen erkennen. Der messbare Unterschied zwischen den T-Profilen im Umfeld der Unterbrechungen beträgt hier ca. 25 °C. Bei nur einer Unterbrechung sind kaum globale Auswirkungen auf die Temperaturverteilung zu erkennen. Ein qualitativer Vergleich mit FEM-Aufnahmen einer identischen Probenanordnung ist in Abbildung 5-77 dargestellt. Dies macht den Effekt von Stromdichteverlagerungen durch eine Fehlstelle noch deutlicher. Mit zunehmender Verlustleistung steigen auch die um die Fehlstelle herum entstehenden Temperaturgradienten an.

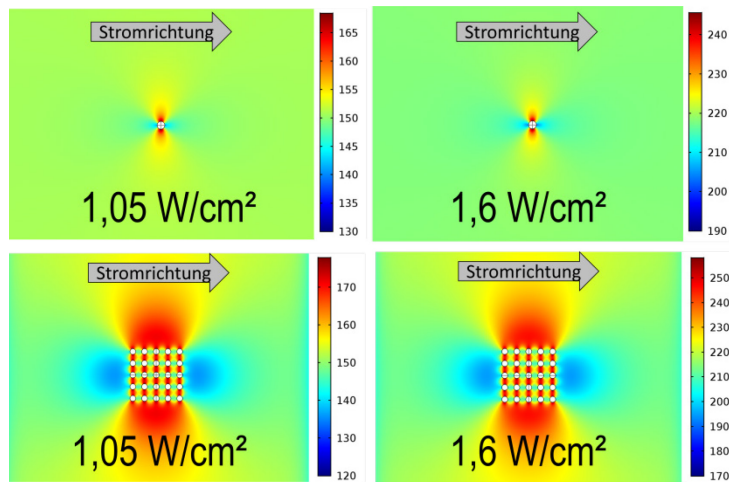


ABBILDUNG 5-77: SIMULIERTE TEMPERATURVERTEILUNGEN AN FEHLSTELLEN IN EINER HOMOGENEN HEIZSCHICHT; 1 ZYLINDRISCHE FEHLSTELLE (OBEN); 25 ZYLINDRISCHE FEHLSTELLEN (UNTEN)

Obwohl sie die Funktion als Heizelement nicht unterbrechen, stellen Fehlstellen ein thermisches Problem dar. Es bilden sich lokale Hotspots, welche wiederum zu Schädigungen führen können. Durchkontaktierungen durch die Heizfläche würden zudem über diese kurzgeschlossen werden. Um für eine spätere Anwendung dennoch Bohrungen und vor allem Durchkontaktierungen nutzen zu können, wäre zum Beispiel die horizontale Segmentierung einer Heizschicht bzw. mehrerer Heizsegmente denkbar. In Abbildung 5-78 soll dieses Konzept an einem vereinfachten Layoutausschnitt verdeutlicht werden.

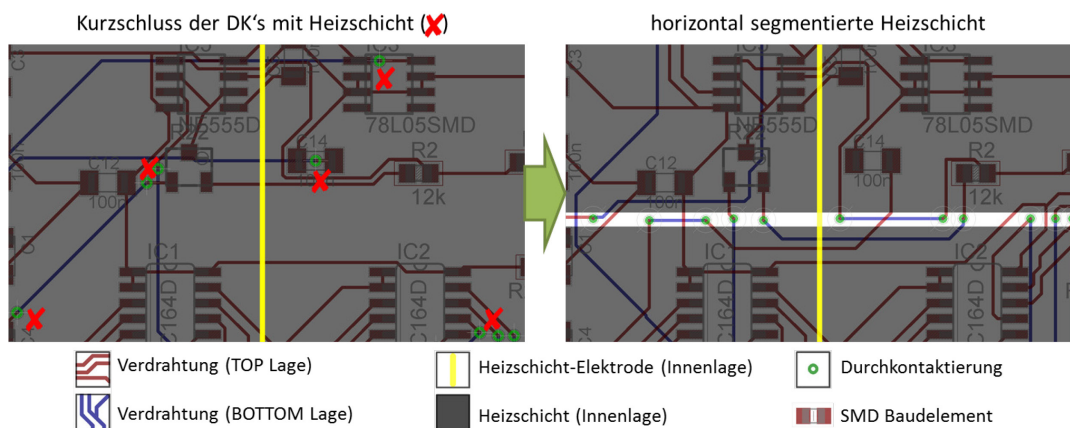


ABBILDUNG 5-78: AUSSCHNITT VOM CAD-LAYOUT EINER LEITERPLATTE MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT; KURZSCHLÜSSE IN DER VERDRAHTUNG DURCH HEIZSCHICHT (LINKS); SEGMENTIERTE HEIZSCHICHT MIT FREIFLÄCHEN FÜR DURCHKONTAKTIERUNGEN (RECHTS)

Sicher ist jedoch, dass es im Bereich derartiger Freiflächen zu einem deutlichen Temperaturgefälle gegenüber den beheizten Bereichen kommen wird. Daher dürfen sich im Bereich dieser Flächen keine Bauelementanschlüsse befinden, sollte die Heizschicht

z.B. für Lötprozesse verwendet werden. Alternativ können wärmespreizende Strukturen (z.B. Kupfer) auf einer separaten Innenlage verwendet werden (sofern es die Verdrahtung zulässt), um die Temperaturgradienten zu reduzieren. Bei paralleler Ansteuerung segmentierter Heizbereiche müssen gleich große Flächen mit gleichen Widerstandswerten verwendet werden.

6. ANWENDUNGSBEISPIELE UND BEWERTUNG DER QUALITÄT

In diesem Kapitel sollen sowohl Untersuchungen zur Bewertung der Qualität der Heizschichten als auch zwei Anwendungsfelder für die hier untersuchten Heizschichten diskutiert werden. Bereits in Kapitel 5 konnte veranschaulicht werden, dass die elektrischen Widerstände der applizierten Heizschichten unmittelbaren Einfluss auf die Erwärmungscharakteristik von Testplatinen haben und dabei gleichzeitig von den thermischen sowie klimatischen Umgebungsbedingungen abhängig sind. Daher sollen an dieser Stelle gezielte thermische sowie klimatische Auslagerungen mit entsprechend vorbereiteten Heizschichtproben durchgeführt werden mit denen dann deren Einfluss auf die Schichtwiderstände bewertet wird. Im letzten Abschnitt werden dann Anwendungsbeispiele für Leiterplatten mit einer der hier untersuchten integrierten Heizschicht vorgestellt und diskutiert.

Inhalt

6.1 BEWERTUNG DER QUALITÄT RESISTIVER HEIZSCHICHTEN

6.1.1 LANGZEITSTABILITÄT BEI THERMISCHER BELASTUNG DER HEIZSCHICHTEN

Eine zeit- sowie temperaturabhängige Messung der Schichtwiderstände der verschiedenen Heizschichten wurde bereits anhand des Laminierprozesses und während kurzer (< 10 min) aktiver Heizbetriebe dargestellt und diskutiert. Aus diesen Messungen ist bereits zu erkennen, dass die Temperatur einen eindeutigen Einfluss auf die Widerstandsänderungen der verschiedenen Materialien hat. Es konnten auch deutliche Unterschiede zwischen den Folienmaterialien (NiP-Schicht) und den einzelnen Carbon-Schichten untereinander festgestellt werden.

Widerstandsänderungen

Im Folgenden soll die Langzeitentwicklung der Schichtwiderstände verschiedener Proben während mehrerer passiver Erwärmungsschritte im Umluftofen dargestellt werden. Mit ihnen sollen stationäre Temperatureinflüsse, wie sie z.B. bei späteren Prozessen (Trocknung, Burn-In,...) oder unter anspruchsvolleren Umgebungsbedingungen an einer Leiterplatte/Baugruppe auftreten können, simuliert werden. Für die Auslagerungen wurden Heizschichten aus NiP, CP-2 und CP-3 im freiliegenden und im eingebetteten Zustand untersucht. Die genutzten thermischen Belastungszyklen sind in Abbildung 6-1 dargestellt. Es wurden drei Zyklen bei 85 °C, zwei bei 125 °C und ein Zyklus bei 185 °C verwendet. Bevor die nächste Messung initiiert wurde, ist zwischen den einzelnen Zyklen eine Relaxationszeit von mehreren Stunden eingehalten worden.

Temperaturzyklen und Messaufbau

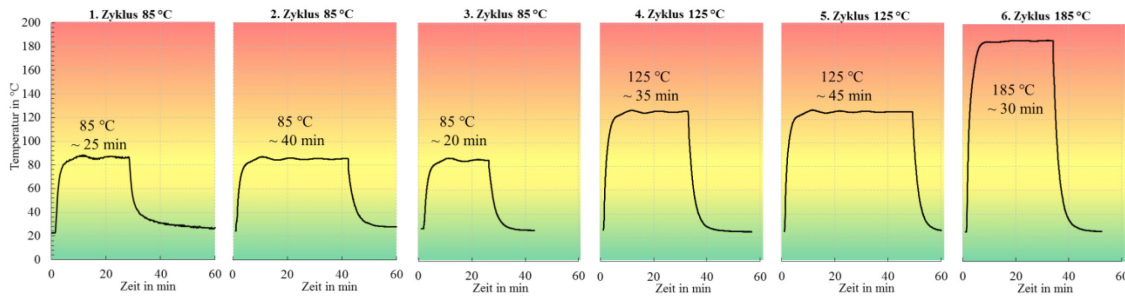


ABBILDUNG 6-1: TEMPERATURPROFILE FÜR KONSEQUENTE AUSLAGERUNG VON VERSCHIEDENEN HEIZSCHICHTEN

Für die Untersuchung sind Proben mit ca. 80 mm x 80 mm großen Heizschichten entsprechend der Beschreibungen in Kapitel 5 angefertigt worden. Die Messung der einzelnen Schichtwiderstände erfolgte automatisch alle 10 s mit einem Digital-Ohmmeter [290]. Um den Einfluss der Messleitungen auszublenden, sind die Proben nach dem 4-Leiter-Prinzip vermessen worden. Zur Temperaturüberwachung wurden Thermoelemente im Ofen und an den Proben angebracht. Den prinzipiellen Messaufbau zeigt Abbildung 6-2.

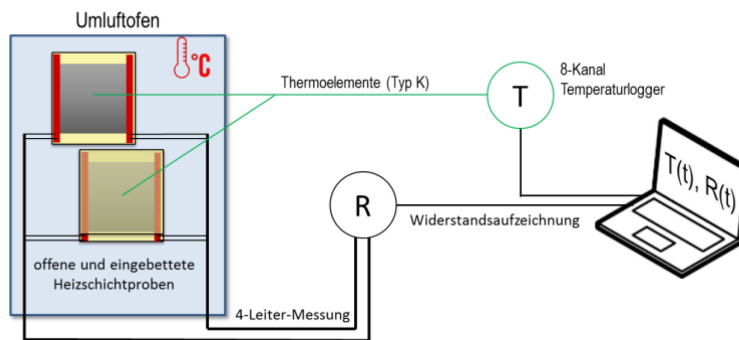


ABBILDUNG 6-2: MESSAUFBAU FÜR ERFASSUNG DER WIDERSTANDSÄNDERUNGEN BEI THERMISCHER AUSLAGERUNG

Es sollen hier die zusammengefassten Messergebnisse für die drei Heizschichttypen dargestellt werden. Da diese durch die Überlagerung der einzelnen Zyklen etwas unübersichtlich sein können, sind zusätzlich die Einzelmessungen für jeden Zyklus in den **Anhängen K, L und M** zu finden.

Nach den vorherigen Messergebnissen wird in den NiP-Schichten ein Kristallisationseffekt vermutet, welcher bei erhöhten Temperaturen einen endlichen Abfall der Resistivität in der Schicht bewirkt. Die dargestellten Ergebnisse bei der freiliegenden Schicht in Abbildung 6-3 (links) lassen dies ebenfalls erkennen. Die Widerstandsreduzierung bei 85 °C ist vergleichsweise gering und ist am deutlichsten in **Anhang K** zu erkennen. Anhand der Abkühlkurve der ersten drei Zyklen ist ein überlagerter NTC-Einfluss erkennbar. Dennoch ergab sich nach drei Zyklen bei 85 °C ein um ca. 6 % verringerter Schichtwiderstand an der freiliegenden Probe. Im vierten Zyklus (125 °C) fiel der Wert

Widerstandsentwicklung der NiP-Schichten

um weitere 31 %. An der Kurve ist auch zu erkennen, dass sich der schichtverändernde Effekt einem Grenzwert annähert. Aus diesem Grund fiel der Widerstand im fünften Zyklus nur noch um weitere 8 %. Bei 185 °C erfolgt die Strukturänderung im NiP deutlich schneller, so dass bereits nach ca. 5 min und einem Abfall um weitere 7 % ein nahezu konstanter Widerstandsverlauf ersichtlich ist.

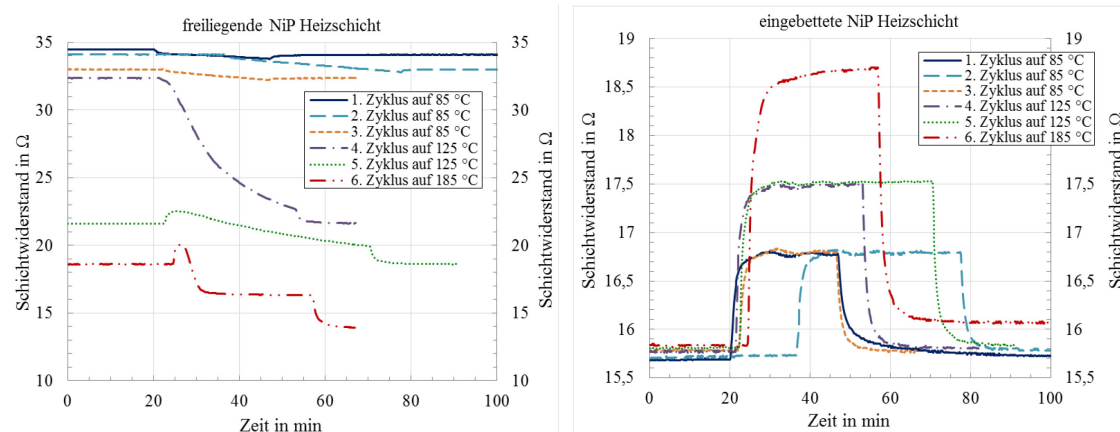


ABBILDUNG 6-3: ÄNDERUNGEN DES SCHICHTWIDERSTANDES AN FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) NICKEL-PHOSPHOR-HEIZSCHICHT BEI VERSCHIEDENEN THERMISCHEN AUSLAGERUNGEN

An den eingebetteten NiP-Schichten kann wiederum ein vordergründiges PTC-Verhalten beobachtet werden. Bis auf den sechsten Zyklus entsprechen die gemessenen Widerstandskurven mit guter Genauigkeit den Temperaturkurven aus Abbildung 6-1. Es lässt sich hier ein linearer Temperaturkoeffizient von $10,3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$ berechnen. Im letzten Zyklus kann hingegen ein dauerhafter Widerstandsanstieg beobachtet werden. Da mit 185 °C die Glasübergangstemperatur des umgebenden Substratmaterials überschritten wurde, wird hier von einer Deformation in der 400 nm dünnen Schicht auf dem erweichenden Trägermaterial ausgegangen, welche eine irreversible Widerstandserhöhung zur Folge hatte.

In den Messungen von CP-2 (Abbildung 6-4) konnte erstmalig mit diesem Material auch ein reversibler NTC-Effekt an nicht eingebetteten Proben beobachtet werden. In den Einzelmessungen im **Anhang L** ist dies deutlicher zu erkennen. Ursache kann ein Einfluss von Feuchtigkeit aus der Umgebung sein, welcher aber deutlich geringer zu sein scheint als bei CP-3-Schichten. Als weitere Möglichkeit kommt in Betracht, dass der Einfluss vom negativen Temperaturkoeffizienten des Kohlenstoffs hervorgerufen wird. Überlagert wird dies durch den bereits diskutierten PTC-Effekt infolge der thermischen Expansion der Polymermatrix. Alle Zyklen riefen eine dauerhafte Senkung des Schichtwiderstandes hervor. Den größten Einfluss hatte die Auslagerung bei 185 °C mit einem Anteil von 30 %. Ähnliches konnte in den aktiven Messungen beobachtet wer-

Widerstandsentwicklung der CP-2-Schichten

den und deutet auf ein Überschreiten der Glasübergangstemperatur/Schmelztemperatur der Polymermatrix hin.

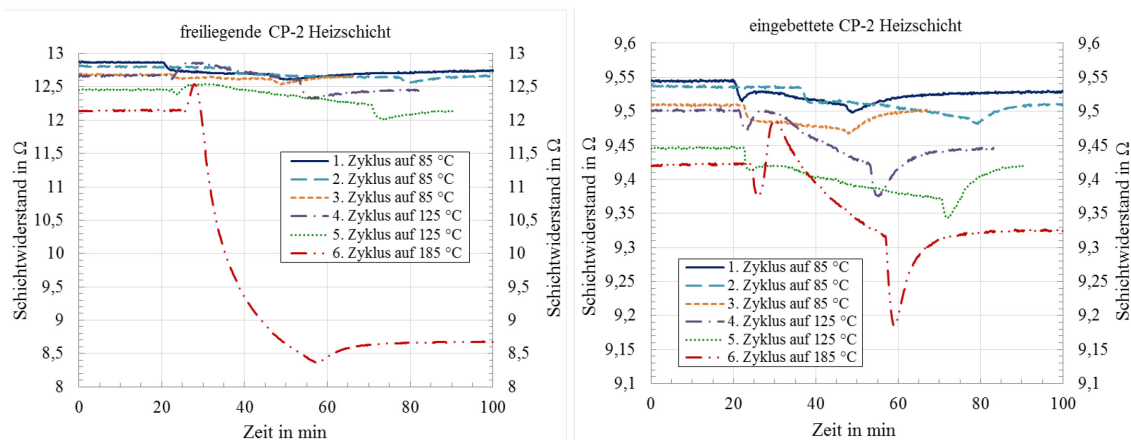


ABBILDUNG 6-4: ÄNDERUNGEN DES SCHICHTWIDERSTANDES AN FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) CP-2-HEIZSCHICHT BEI VERSCHIEDENEN THERMISCHEN AUSLAGERUNGEN

Im eingebetteten Zustand scheint dieser Effekt deutlich abgedämpft zu sein. Die größte absolute Widerstandsänderung auf Grund von NTC- und PTC-Effekten tritt während des 185 °C Zyklus auf und beträgt ca. 3 %. Im Vergleich zum Ausgangswert fällt der Widerstand irreversibel um ca. 2,3 % nach Abschluss der sechs Zyklen. Auf Grund der verringerten Überlagerung durch den PTC-Anstieg sind die NTC-Abfälle und Anstiege zu Beginn und Ende jeder Auslagerung deutlicher auszumachen.

Die Heizschichten aus CP-3-Material unterliegen, im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien, in ihrem Widerstandsverhalten den größten Schwankungen. Dies lässt sich sowohl an Schichten, die freiliegen, als auch an eingebetteten Strukturen (Abbildung 6-5 & **Anhang M**) erkennen. Hervorzuheben ist das beinahe gegensätzliche Verhalten der beiden Varianten. Während im eingebetteten Zustand ein dominierender PTC-Verlauf gemessen werden konnte, sind die Widerstandsverläufe der freiliegenden Schichten (besonders bei 85 °C) von einem beinahe reversiblen NTC-Verhalten geprägt. Mit Hinblick auf die Messungen in Abschnitt 5.5 kann davon ausgegangen werden, dass die Ursachen hierfür die Absorption/Desorption von Umgebungsfeuchte und das damit verbundene Anschwellen/Abschwellen der carbongefüllten Polymermatrix sind.

Widerstandsentwicklung der CP-3-Schichten

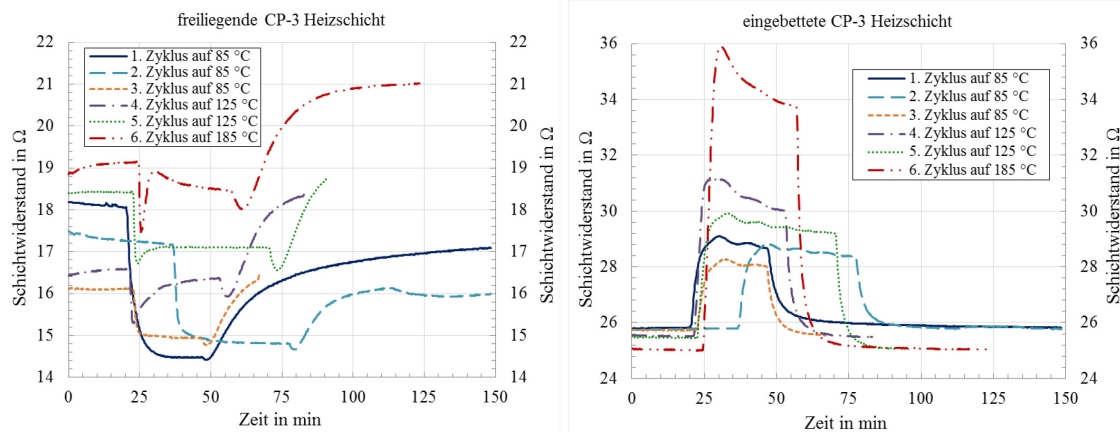


ABBILDUNG 6-5: ÄNDERUNGEN DES SCHICHTWIDERSTANDES AN FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) CP-3-HEIZSCHICHT BEI VERSCHIEDENEN THERMISCHEN AUSLAGERUNGEN

An den freiliegenden Schichten ist außerdem zu erkennen, dass der Relaxierungseffekt (erneute Anlagerung von Wassermolekülen in der Schicht) zum Ende der Messwertaufzeichnungen noch nicht vollständig abgeschlossen war. Die Wiederaufnahme der Datenerfassung im nächsten Zyklus zeigte daher häufig einen veränderten Ausgangswert an, der sich über mehrere Stunden zwischen den Einzelmessungen eingestellt hatte. Daraus lässt sich entnehmen, dass nach den Zyklen bei 85 °C der Widerstand dauerhaft abgesunken ist. Im Gegensatz dazu trugen die Zyklen bei 125 °C und 185 °C zu einer dauerhaften Erhöhung des Widerstandswertes bei. Insgesamt hat sich der Schichtwiderstand der freiliegenden Schicht um ca. 15 %, im Vergleich zum Ausgangswert, erhöht und der Widerstand der eingebetteten Schicht um ca. 5 % verringert. Die größte relative Änderung im Prozess war mit ca. 40 % bei 185 °C an der eingebetteten Probe messbar.

Die Messungen bestätigen größtenteils die in Kapitel 5 gemachten Beobachtungen an den untersuchten Heizschichten. Die eindeutigste Abhängigkeit zeigt die NiP-Heizschicht. Bei dieser gilt zu beachten, dass infolge von thermischen Belastungen ein irreversibler Widerstandsabfall stattfindet. Mit vorgelagerten Temperprozessen kann dieser Effekt provoziert und der Schichtwiderstand in einen stabilen Zustand gebracht werden. Weitestgehend kann dies bereits in Kombination mit einem Laminierprozess erfolgen. Die Carbon-Schichten zeigen im Vergleich zu den freiliegenden Varianten ebenfalls deutliche Unterschiede nach dem Einlaminieren. Die temperaturabhängigen Widerstandsverläufe sind dennoch von einer Überlagerung verschiedener Effekte geprägt. Bei ähnlichen Messungen an CP-5-Schichten zeigten sich dieselben Schwankungen und Abhängigkeiten des elektrischen Widerstandes.

Diskussion

6.1.2 STABILITÄT BEI KLIMATISCHER BELASTUNG AUF HEIZSCHICHTEN

Im vorherigen Kapitel wurde bereits auf den klimabedingten Einfluss auf die hier untersuchten Heizschichten hingewiesen. So scheint bereits die Umgebungsfeuchte in den Carbon-Schichten eine signifikante Widerstandsänderung zu induzieren. Als Weiterführung der vorherigen thermischen Auslagerungen wurden daher an weiteren Carbonproben klimatische Zyklusuntersuchungen in Klimakammern durchgeführt. Ziel war es dabei, den Einfluss auf die Schichtwiderstände durch Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit von den thermischen Abhängigkeiten unterscheidbar und darstellbar zu machen.

Klimatische
Untersuchung

Die Messanordnung für die Erfassung der Schichtwiderstände während verschiedener klimatischer Belastungen entspricht dem in Abbildung 6-2 dargestellten Aufbau. Allerdings erfolgte die Anordnung der Proben in einem Klimaprüfschrank mit regulierbarer relativer Feuchte [291], [292] (anstatt Umluftofen). Für die Untersuchung des Feuchteinflusses auf die Heizschichtwiderstände wurden mehrere Zyklen des in Abbildung 6-6 dargestellten klimatischen Belastungsprofils in der Klimakammer eingestellt. Innerhalb des Profils erfolgte eine stufenweise Erhöhung der Temperatur für je 15 Stunden auf die Temperaturen 20 °C, 40 °C und 85 °C. Innerhalb einer jeden Temperaturstufe wurden drei verschiedene relative Feuchteniveaus von 50 %, 85 % und 93 % für je 5 h gehalten. Mit diesem Profil konnten so neun verschiedene Temperatur/Feuchte-Kombinationen, darunter typische Umweltsimulations-Parameter, wie z.B. 40 °C/ 93 % r. F. oder 85 °C/ 85 % r. F., getestet werden.

Messaufbau und
Klimaprofil

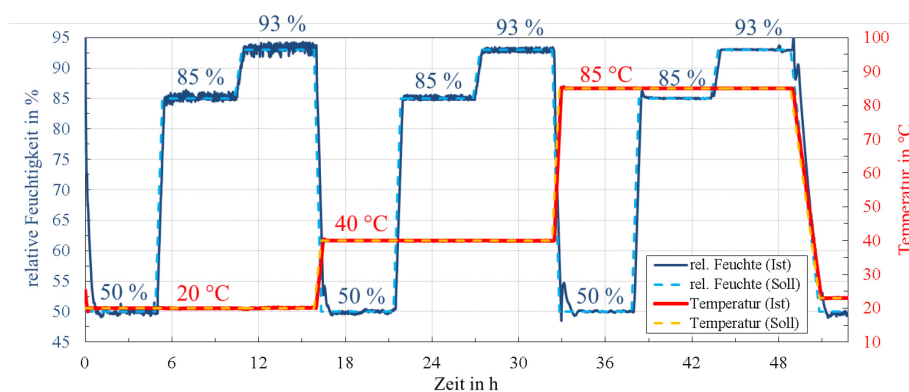


ABBILDUNG 6-6: KLIMATISCHES BELASTUNGSPROFIL FÜR DIE UNTERSUCHUNG DES FEUCHTEEINFLUSS AUF HEIZSCHICHTEN (EINZELNER ZYKLUS)

Mit den Messungen im Klima wurde deutlich, dass die unterschiedlichen Feuchteniveaus einen signifikanten Einfluss auf die Schichtwiderstände der freiliegenden Car-

Feuchteinfluss auf
carbongefüllte
Polymere

bon-Schichten haben. In Abbildung 6-7 ist der Einfluss für drei aufeinanderfolgende klimatische Zyklen dargestellt. Aus ihnen ist erkennbar, dass die Widerstandsniveaus der freiliegenden Schicht den stufenartigen Anstiegen der Feuchte folgen. Die größten Widerstandsunterschiede konnten dementsprechend bei 85 °C beobachtet werden, da bei dieser Temperatur auch die höchsten absoluten Feuchtwerte erreicht wurden. Bei der eingebetteten Schicht konnte kein messbarer Einfluss der erhöhten Luftfeuchtigkeit beobachtet werden.

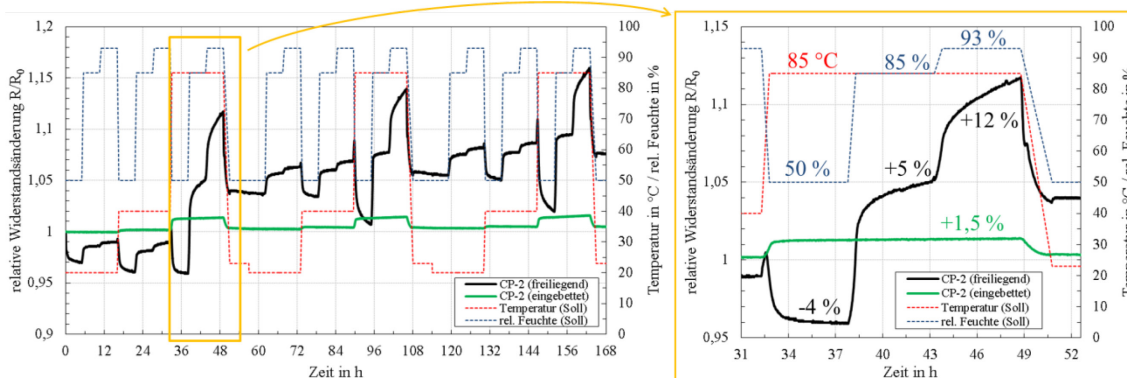


ABBILDUNG 6-7: WIDERSTANDSVERLAUF VON FREILIEGENDER UND EINGEBETTETER CP-2-HEIZSCHICHT WÄHREND DREI ZYKLEN MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL

Die Widerstandswerte der eingebetteten Schichten bei CP-2 und CP-3 (Abbildung 6-8) folgen vorrangig den Temperaturstufen und können daher auf die thermische Ausdehnung der Matrix zurückgeführt werden. Viel stärker ausgeprägt (als mit CP-2) stellte sich die Feuchteabhängigkeit der freiliegenden CP-3-Schichten dar. In Abbildung 6-8 ist zu erkennen, dass der Widerstandsverlauf stark mit dem Wassergehalt der Umgebung korreliert. Bei einer Prüfraumtemperatur von 85 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 93 % erhöhte sich der gemessene Schichtwiderstand auf ca. das 3,4-fache. Die eingebettete CP-3-Schicht zeigt auch hier eine Widerstandsänderung, die vorrangig von der Umgebungstemperatur und der durchwärmten Probe abhängig ist.

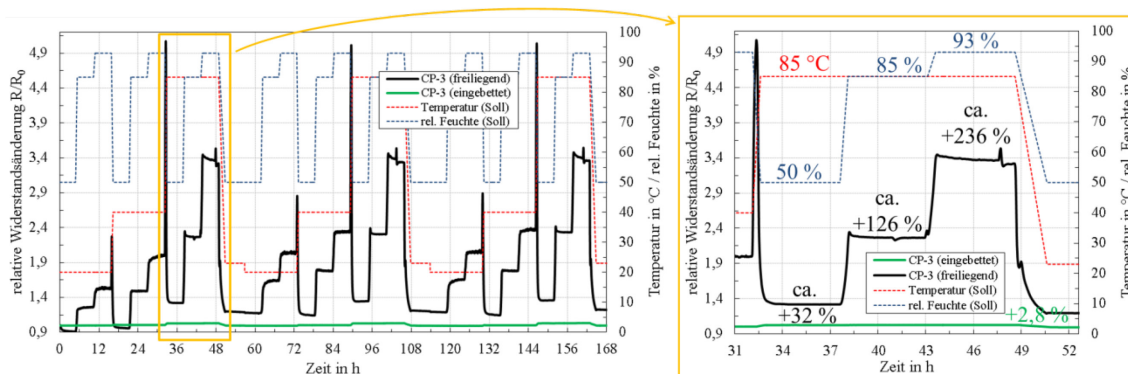


ABBILDUNG 6-8: WIDERSTANDSVERLAUF VON FREILIEGENDER UND EINGEBETTETER CP-3-HEIZSCHICHT WÄHREND DREI ZYKLEN MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL

Die gemessene Änderung der Schichtwiderstände an Schichten der carbongefüllten Polyimidfolie sind in Abbildung 6-9 dargestellt. Die freiliegende Polyimidschicht reagiert ebenfalls auf die Feuchteänderungen, jedoch in deutlich schwächerer Form als bei den vorherigen Carbon-Schichten. Die eingebettete Schicht zeigt hingegen ein überlagertes NTC-Verhalten, welches vorrangig mit der Temperatur korreliert. Da bis 85 °C kein Erweichen der Polyimidmatrix zu erwarten ist, lässt dies auf das NTC-Verhalten der Kohlenstoffpartikel schließen.

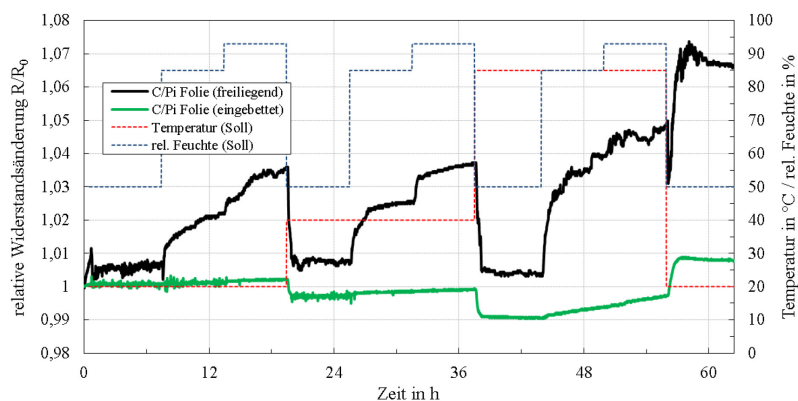


ABBILDUNG 6-9: WIDERSTANDSVERLAUF VON FREILIEGENDER UND EINGEBETTETER C/PI-FOLIEN-HEIZSCHICHT WÄHREND EINES ZYKLUS MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL

Der schützende Effekt des Einbettens der Schichten zwischen FR-4-Lagen konnte in den Messungen deutlich gemacht werden. In Abbildung 6-10 sind noch einmal die eingebetteten Schichten CP-2, CP-3 sowie die C/PI-Folie in direktem Vergleich während dreier vollständiger Zyklen dargestellt.

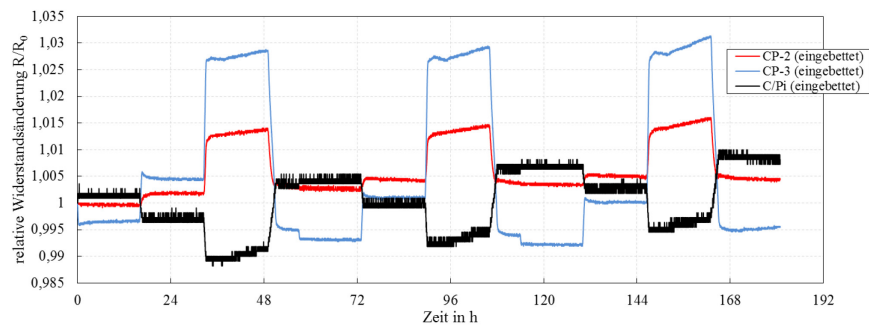


ABBILDUNG 6-10: VERGLEICH DER WIDERSTANDSÄNDERUNGEN VON DREI CARBONGEFÜLLTEN POLYMEREN WÄHREND DREI ZYKLEN MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL

In dem Vergleich lässt sich zudem erkennen, dass sich vor allem bei den höchsten Feuchteniveaus (50 %, 85 % und 93 % bei 85 °C) kein konstantes Plateau der Widerstandswerte ausbildet. Vielmehr deuten die geringen Anstiege auf eine Feuchtediffusion in die Schichten hin. Diese lief im Gegensatz zu den freiliegenden Proben verlangsamt ab. Somit bietet das Einbetten bei sehr hohen Luftfeuchtigkeitswerten nur einen zeitlich begrenzten Schutz.

In Abbildung 6-11 sind die Widerstandsmessungen von NiP-Schichten während eines klimatischen Zyklus dargestellt. Die gemessenen Änderungen sind im Vergleich zu den vorherigen Schichten um mindestens eine Größenordnung kleiner. Mit der verfügbaren Messauflösung ($0,01 \Omega$) konnte zudem kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Luftfeuchtigkeit und den gemessenen Änderungen festgestellt werden.

Feuchteinfluss auf
NiP-Heizschichten

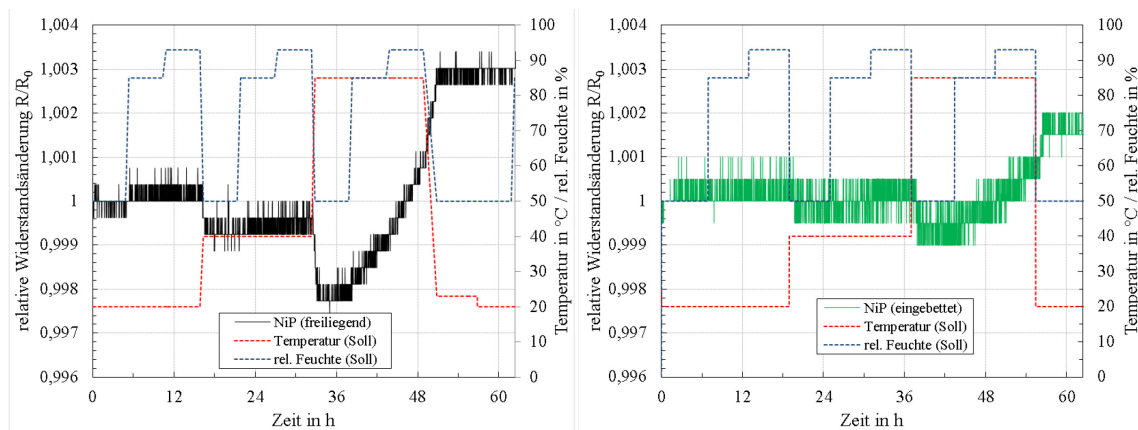


ABBILDUNG 6-11: WIDERSTANDSVORLAUF VON FREILIEGENDER (LINKS) UND EINGEBETTETER (RECHTS) NiP-SCHICHT WÄHREND EINES ZYKLUS MIT DEM KLIMATISCHEN BELASTUNGSPROFIL

Es fällt jedoch auf, dass bei den klimatischen Auslagerungen der NiP-Schichten stets ein NTC-Widerstandsverhalten gemessen wurde. Dies steht in deutlichem Widerspruch zu den bisherigen Messungen (aktiv und passiv) mit NiP-Schichten, die bisher einen reversiblen PTC-Verlauf infolge einer Erwärmung aufzeigten. In den Veröffentlichungen

[293] und [294] werden u.a. auch negative Temperaturkoeffizienten bei NiP-Schichten gemessen. Die Größe und Art des Temperaturkoeffizienten hängt dabei von vielen Einflussfaktoren bei der Schichtherstellung (z.B. pH-Wert und Temperatur der Badabscheidung) und der Vorbehandlung (z.B. Temperprozesse) ab. Die hier vermessenen NIP-Folien stammen aus einer anderen Produktionscharge (des Lieferanten). Es kann daher nur vermutet werden, dass bereits vorhandene Unterschiede in der Schicht für das hier gemessene NTC-Verhalten verantwortlich sind.

6.2 ANWENDUNGEN FÜR INTEGRIERTE HEIZSCHICHTEN

Als abschließender Teil dieser Arbeit sollen an dieser Stelle einzelne Demonstrationsversuche vorgestellt werden, in deren Umsetzung einige der hier untersuchten Heizschichten Anwendung finden. Bei den Demonstratoren und Prozessen handelt es sich um Laboraufbauten, mit denen die grundsätzliche Machbarkeit veranschaulicht werden soll. Zu Beginn dieser Arbeit wurden bereits eine Reihe möglicher Anwendungen für endogen erwärmbare Leiterplatten diskutiert. In den folgenden Abschnitten werden ein exemplarischer Lötprozess sowie Beispiele für Zuverlässigkeitsuntersuchungen beschrieben.

Demonstratorversuche

6.2.1 DEMONSTRATOREN ZUM ENDOGENEN LÖTEN

6.2.1.1 LÖTEN MIT INDUKTIVER ERWÄRMUNG

Unter Anwendung der bereits in Kapitel 4 beschriebenen Suszeptoren und Versuchsstände zur induktiven Erwärmung soll anhand von Lötdemonstratoren die Eignung des Verfahrens für das Umschmelzen von Lotmaterial auf Leiterplatten und dem damit verbundenen Erzeugen von Lötverbindungen gezeigt werden. Die hierfür verwendeten Probencoupons sind in ihrer Nutzfläche (ca. 50 mm x 20 mm) deutlich kleiner gehalten als übliche Platinengrößen. Begründet ist dies zum einen durch die geringen geometrischen Abmessungen im Raum des Längsfeldinduktors, dessen Zylinderspule etwa 35 mm im Durchmesser beträgt. Zum anderen soll durch kleinere Proben der Einfluss der inhomogenen Feldverteilung im Suszeptor minimiert werden, welche sich vor allem durch die auf die Spulenachse begrenzte Querfeldkomponente des Flachspuleninduktors bemerkbar macht. In Abbildung 6-12 ist das Beispiel für einen hierfür verwendeten Probencoupon dargestellt. Auf Grund des begrenzten Platzes (durch Probenbreite und die sich effektiv erwärmende Suszeptorfläche) wurden zwei IC-Komponenten als zu

Probendemonstrator zum induktiven Löten

verlötende Bauteile ausgewählt. Um im Anschluss an den induktiven Lötprozess einen einfachen elektrischen Funktionstest durchführen zu können, wurden ein Inverter (LS04 [295]) in einer SO-14-Gehäuseform und ein Festspannungsregler (LM78L12ACM [296]) in einer SO-8-Gehäuseform verwendet.

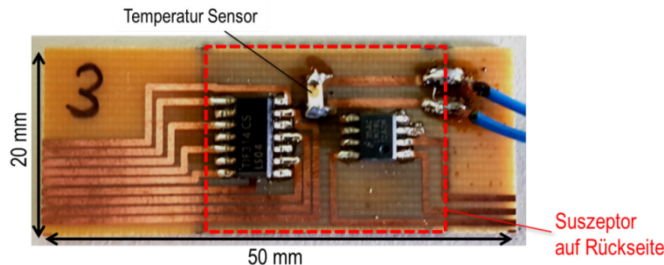


ABBILDUNG 6-12: PROBENDEMONSTRATOR FÜR DAS LÖTEN MIT INDUKTIVER ERWÄRMUNG AN INTEGRIERTEN SUSZEPTOREN

Die Suszeptoren wurden, um eine einfache Probenherstellung zu ermöglichen, auf der Rückseite des Basismaterials aufgebracht. Bereits in den Vorbetrachtungen ist diskutiert worden, dass eine freiliegende Heizschicht den thermisch anspruchsvolleren Aufbau gegenüber einer eingebetteten Schicht darstellt. Die Untersuchungen in Abschnitt 4.5 haben jedoch gezeigt, dass sich mit entsprechenden Suszeptoren hinreichend Wärmeenergie erzeugen lässt, um die für den Lötprozess erforderlichen Temperaturen (bis $\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) auf der gegenüberliegenden Seite zu erreichen. Um hierbei Schädigungen im Basismaterial vorzubeugen, wurde für diesen Versuch auf Polyimid-Laminat ($d = 0,5\text{ mm}$) mit einem $T_G > 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [297] zurückgegriffen. Für den Quersfeld-Lötdemonstrator fanden $100\text{ }\mu\text{m}$ dicke Kupfersuszeptoren mit den Abmessungen $20 \times 30\text{ mm}$ Verwendung. Dies liegt in der Nähe von dem in Abschnitt 4.5.1 bestimmten Optimum. Bei dem Lötdemonstrator für den Längsfeldspuleninduktor wurde auf $\sim 60\text{ }\mu\text{m}$ dicke Nickelschichten mit den Abmessungen $20\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ zurückgegriffen, welche zuvor auf eine entsprechende Kupferfläche aufgalvanisiert wurden.

Suszeptor- und
Basismaterial

Als Lotmaterial wurde eine SAC305-Lotpaste (Typ 3) verwendet, welche mittels manuellem Schablonendruck ($d = 200\text{ }\mu\text{m}$) auf die Demonstratorcoupons appliziert wurde. Die Bestückung der IC-Bauteile erfolgte ebenfalls manuell. Für die spätere Temperaturerfassung und Regelung im zylindrischen Längsfeldinduktor wurde zusätzlich ein SMD-Widerstand in das Layout integriert. Dieser ist im Vorfeld auf seine temperaturabhängige Widerstandsänderung hin kalibriert worden und konnte so anstelle der durch das elektromagnetische Feld beeinflussten Thermoelemente genutzt werden. Die Fixierung des Messwiderstandes und dessen Zuleitungen erfolgte separat auf den Proben mit Handlötten und der Verwendung von Pb93Sn5Ag2-Lotdraht ($T_L = 301\text{ }^{\circ}\text{C}$) [298].

Probenvorbereitung

Die vorbereiteten Proben konnten somit mittels der aufgetragenen Suszeptoren innerhalb des jeweiligen Induktorfeldes erwärmt werden. Abbildung 6-13 zeigt eine IR-Aufnahme während der Erwärmung einer solchen Probe im Querfeld des Flachspuleninduktors.

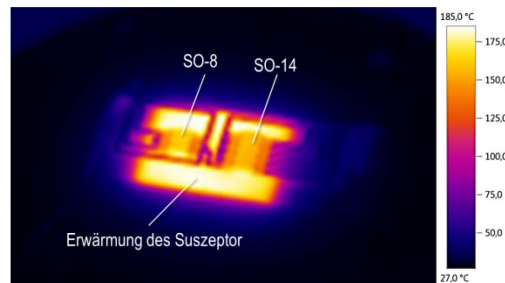


ABBILDUNG 6-13: ERWÄRMUNG EINER LÖTDEMONSTRATOR-PROBE MIT KUPFERSUSZEPTOR IM ELEKTROMAGNETISCHEN QUERFELD

Nach ersten Lötversuchen mit manueller Anpassung der Induktorleistung zur Temperaturvariation, die wiederholt eine thermische Schädigung der Leiterplatte durch Überspringen der Temperatur zur Folge hatte, wurde eine Prozesssteuerung zur automatisierten Temperaturprofil-Regelung aufgebaut. Dafür wurde eine PID-Regelung durch ein LabVIEW-Programm genutzt. Auf Grund der sich unterscheidenden Hardwareaufbauten beider Induktions-Versuchstände und den unterschiedlichen Temperaturmessmöglichkeiten fanden verschiedene Regelkreise für die Quer- und Längsfelderwärmung Anwendung. So konnte zum Beispiel für die Quersfelderwärmung die Regelung nach pyrometrisch erfasster Temperatur auf der Probenoberseite durchgeführt werden. Im Längsfeldinduktor wurde die Temperaturregelung mit dem aufgelöteten Messwiderstand realisiert. Die Blockdiagramme beider Regelstrecken sind in Abbildung 6-14 skizziert.

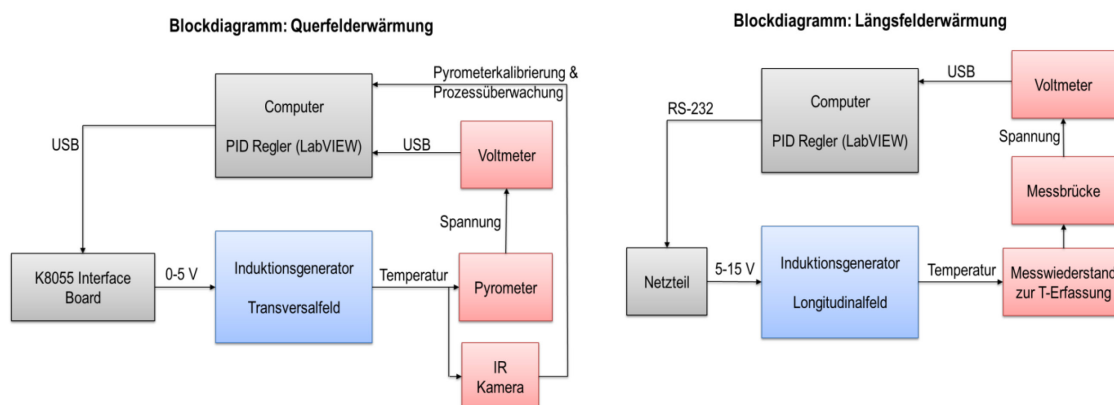


ABBILDUNG 6-14: BLOCKDIAGRAMME ZUR PROZESSSTEUERUNG INDUKTIVER LÖTPROZESSE IM QUERFELD (LINKS) UND IM LÄNGSFELD (RECHTS)

Um die induktiven Lötversuche möglichst anwendungsnah und reproduzierbar durchführen zu können, wurden mit Hilfe der LabVIEW-Software Temperaturprofile vorgegeben, mit deren Hilfe die Regelung erfolgen sollte. Bei der Wahl geeigneter Lötprofile wurde sich an Vorgaben aus Datenblättern verschiedener Lotpastenhersteller ([299], [300]) bzw. an allgemeinen Hinweisen aus [301] orientiert. Es sei darauf hingewiesen, dass hier nicht nach einem optimalen Lötprofil gesucht wurde. Vielmehr sollte die Frage beantwortet werden, ob ein erfolgreicher Lötprozess durch eine hinreichend genaue Regelung nach Vorgabe mit den verwendeten Suszeptor/Induktor-Kombinationen durchgeführt werden kann. In Abbildung 6-15 sind jeweils ein Beispiel für ein vorgegebenes und gemessenes ‚Sattel‘-Lötprofil bei der Querfeld- und der Längsfelderwärmung, mit denen auf Demonstratorproben erfolgreich gelötet wurde, dargestellt.

Regelung nach
Temperaturprofil

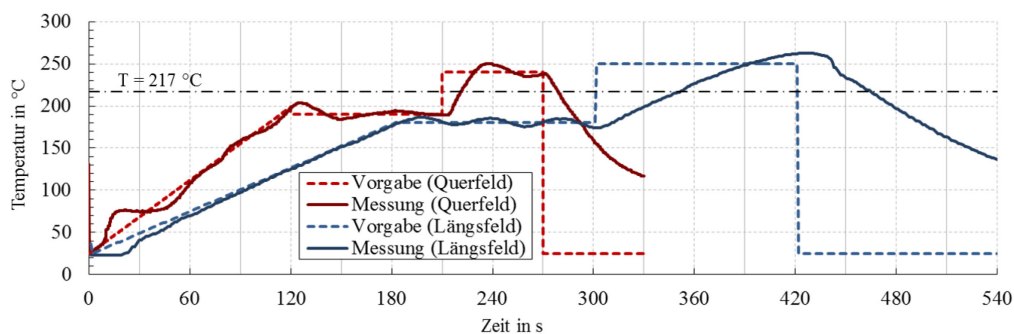


ABBILDUNG 6-15: TEMPERATURPROFILE BEIM INDUKTIVEN LÖTEN MIT SUSZEPTOREN

Für die Lötversuche im magnetischen Längsfeld musste ein längeres Temperaturprofil mit höherer Peak-Temperatur und längerer Haltezeit verwendet werden, da die verwendete Regler/Suszeptor-Kombination (des Längsfeldes) dem Querfeldprofil nicht folgen konnte. Mit beiden Profilvorgaben konnte während des Lötprozesses die geforderte Zeit von 60 s bis 100 s [101] über Liquidustemperatur des Lotes erreicht werden. Durch die Verwendung von dickeren (Nickel-)Suszeptoren kann das Regelverhalten verbessert werden.

Nach der visuellen Bestätigung, ob mit den entsprechenden Proben ein Umschmelzen des Lotes erfolgt ist, wurden die Bauelemente einem einfachen elektrischen Funktionstest unterzogen sowie stichprobenartig als Querschliff Abbildung 6-18 lichtmikroskopisch begutachtet.

Beurteilung des
Lötprozesses

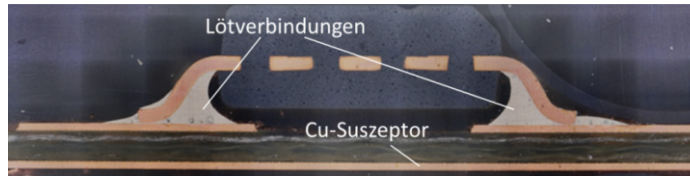


ABBILDUNG 6-16: METALLOGRAPHISCHER QUERSCHLIFF EINES INDUKTIV GELÖTETEN BAUELEMENTES MIT KUPFER-SUSCEPTOR AUF DER UNTERSEITE DER PLATINE

An korrekt positionierten Suszeptorproben (keiner Lötstellen außerhalb des Suszeptorbereich) und mit den zuvor beschriebenen Temperaturprofilen konnte stets ein Umschmelzen der Lotpaste erzielt werden. Bei Profil-, Regelungs- oder Suszeptorabweichungen hat sich gezeigt, dass bei Längsfeldproben häufiger nicht-umgeschmolzene Lotdepots in den Randbereichen der Testcoupons zu finden waren. Dies lässt sich auf die unterschiedliche Art der Erwärmung in den Suszeptoren zurückführen. Während Längsfeldsuszeptoren (ähnlich einer resistiven Schicht) einen abfallenden Temperaturgradienten von der Mitte zum Rand hin aufweisen, verhält es sich bei Querfeldsuszeptoren umgekehrt. Hierdurch konnten Randeffekte (Verluste) an den Querfeldproben besser kompensiert werden. Mit dem elektrischen Funktionstest konnten für die Prozesse in beiden Feldvarianten keine Fehler ermittelt werden.

6.2.1.2 LÖTEN MIT RESISTIVER ERWÄRMUNG

Auch für das Löten auf Baugruppen mit integrierten resistiven Heizschichten sollen Beispiele demonstriert werden. Für die hier vorgestellten Versuche wurde sich für die Verwendung von SnBi58-Lotpaste mit einem Schmelzpunkt von 138 °C entschieden. Die Verwendung von SAC305-Lotpasten hat auf Grund des höheren Temperaturbedarfs häufig zu Schäden an den Demonstratorproben geführt. Zurückführen ließ sich dies vor allem auf die inhomogene Temperaturverteilung der resistiven Heizschichten. Um hiermit einen Lötprozess in allen Bereichen der Platinen abzuschließen, mussten Hotspots teilweise deutlich übersteuert werden, wodurch das umgebende Basismaterial zu sehr strapaziert wurde. Mit dem niedrigschmelzenden Lot konnten die Lötprozesse ohne bleibende Probenschäden absolviert werden.

Probendemonstratoren zum resistiven Löten

Die Proben für die Lötprozesse ähneln in ihrem Top-Lagen-Design dem ‚Layout 2‘ aus **Anhang N**, welches auch für die später beschriebenen Zuverlässigkeitsversuche verwendet wurde. Als Heizschicht wurden in den hier beschriebenen Versuchen NiP-Schichten verwendet, da mit diesen die homogenere Temperaturverteilung und einfachste Regelung zu realisieren war. Eine Skizze des hier verwendeten Versuchs- und Regelungsaufbaus kann Abbildung 6-17 entnommen werden.

Versuchs- und Regelungsaufbau

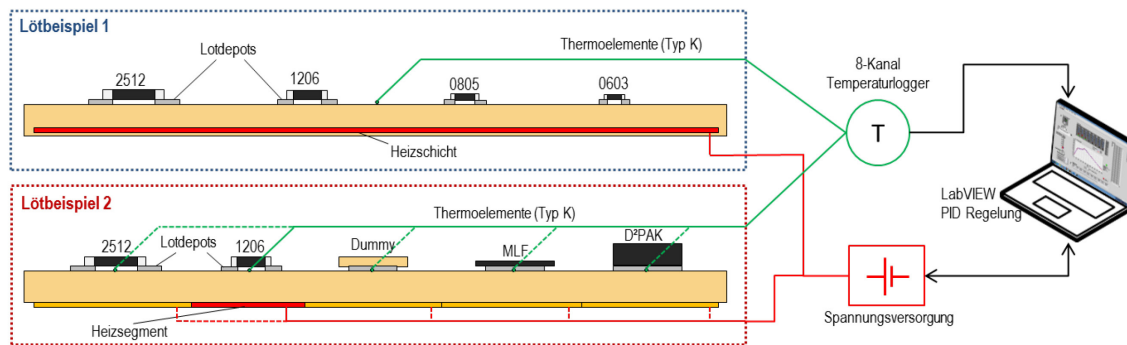


ABBILDUNG 6-17: VERSUCHS- UND REGELUNGS-AUFBAU FÜR DAS RESISTIVE LÖTEN MIT VERSCHIEDENEN DEMONSTRATOREN

Im Lötbeispiel 1 ist eine vollflächig beheizte Schicht, welche zwischen zwei FR-4-Laminaten (Top: 1,5 mm; Bottom: 0,1 mm) eingebettet wurde, verwendet worden. Für das Lötbeispiel 2 wurde eine offene NiP-Heizschicht genutzt, die segmentweise angesteuert wurde. Die Regelung erfolgte, ähnlich wie beim induktiven Lötbeispiel, mit Hilfe einer PID-Regelung über LabVIEW. In dieser konnten die gewünschten Lötprofile eingegeben und entsprechend einer Temperaturmessung mittels Thermoelementen auf der Platinen- bzw. Segmentoberseite geregelt werden.

Die verwendeten Lötprofile sind in Abbildung 6-18 dargestellt. Bei beiden Profilen wurde sich an Reflowprofilvorgaben aus Datenblättern zu SnBi58-Lotpasten orientiert. Für beide Varianten mussten zunächst in Vorversuchen geeignete Regelparameter ermittelt werden. Das Regelungsverhalten in beiden Strecken unterscheidet sich dabei auf Grund der unterschiedlichen Schichtwiderstände (LB 1: $\sim 20 \Omega$; LB 2: $7 - 8 \Omega$). Die Begrenzung der Spannung des regelbaren Labornetzteiles auf 30 V hatte zur Folge, dass der Temperaturverlauf von Beispiel 1 mit einer größeren Trägheit versehen war. Daher wurde hier ein etwas steileres Temperaturprofil als Vorgabe verwendet.

Lötprofile und Temperaturverteilung

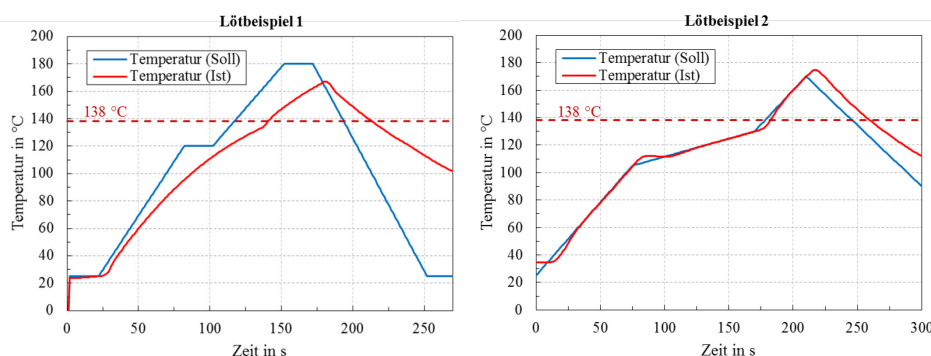
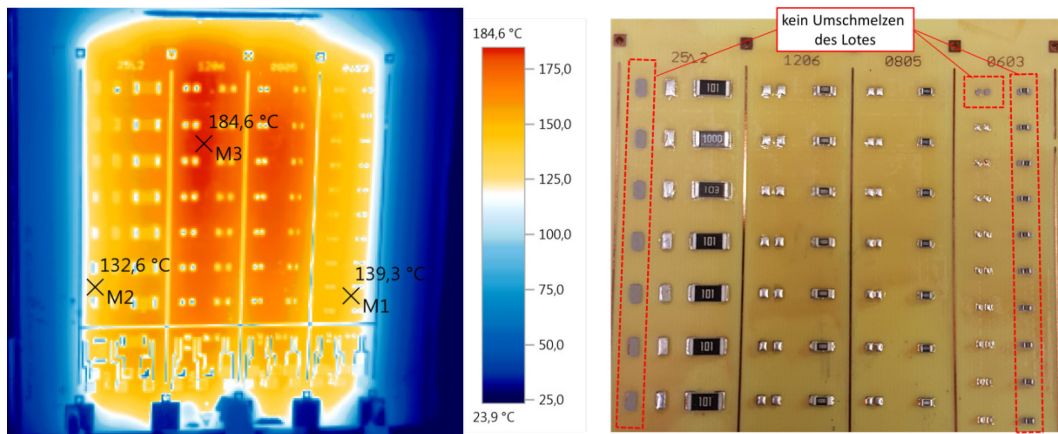


ABBILDUNG 6-18: LÖTPROFILE FÜR DAS RESISTIVE LÖTEN MIT EINEN VOLLFLÄCHIG GEHEIZTEN NiP-SCHICHT (LINKS) UND EINEM NiP-HEIZSEGMENT (RECHTS)

Die zur Regelung genutzten Thermoelemente sind in dem Lötbeispiel 1 auf der Oberseite der Testplatine und in dem Lötbeispiel 2 im Bereich der Bauteile des aktiven Segmentes (Oberseite) positioniert worden. Die während der Versuche aufgenommene Temperaturverteilung kann in den IR-Aufnahmen in der Abbildung 6-19 und Abbildung 6-20 betrachtet werden.

Da für die Versuche bewusst keine weitere konvektive Unterstützung verwendet wurde, Ergebnisse erfolgt das Umschmelzen des Lotmaterials ausschließlich infolge der Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung auf der Oberseite der endogen beheizten Testplatten. Die Schwankungen der Temperaturverteilung bei vollflächig geheizten Schichten wurden bereits diskutiert. In Abbildung 6-19 ist zu sehen, wie sich die ungleichmäßigen Temperaturen auf der Platine auf das Umschmelzergebnis vom Lötbeispiel 1 ausgewirkt haben.



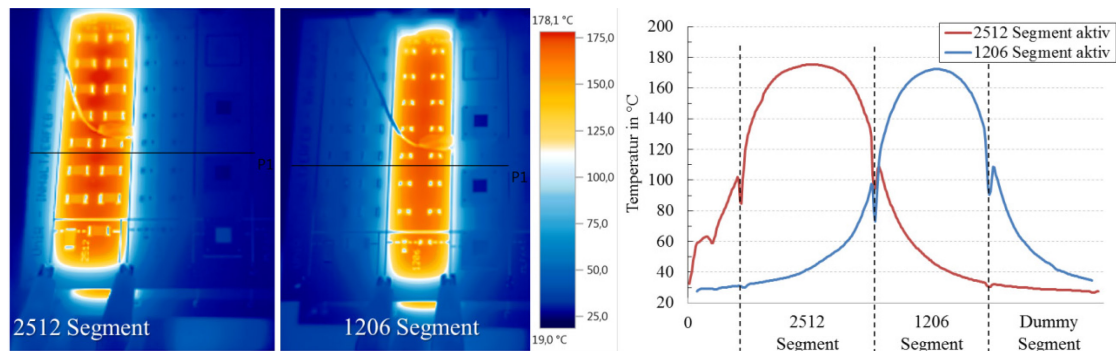


ABBILDUNG 6-20: DEMONSTRATOR FÜR SEGMENTWEISES RESISTIVES LÖTEN (LÖTBEISPIEL 2); IR-AUFNAHMEN DER AKTIVEN SEGMENTE 2512 UND 1206 (LINKS); TEMPERATURVERTEILUNG ÜBER DIE BREITE VON DREI SEGMENTEN FÜR UNTERSCHIEDLICH AKTIVE SEGMENTE (RECHTS)

Obwohl auch hier ein Temperaturgradient zwischen Zentrum und Randbereichen der Segmente verbleibt, konnte an allen Segmenten ein erfolgreiches Umschmelzen der Lotpastendepots erzielt werden. Die Temperaturverteilung in den nicht beheizten Nachbarsegmenten zeigt, dass diese deutlich niedrigeren Belastungen unterliegen. Dennoch muss dies z.B. beim simultan erfolgten Lotpastendruck beachtet werden, da hierbei bereits Anteile des Flussmittels in den benachbarten Depots reagieren und verdampfen können. Ein Mindestabstand von 5 mm zwischen Heizschicht- bzw. Segmentende zum nächsten eigenen bzw. benachbarten Lotanschluss erscheint daher für weitere Testaufbauten sinnvoll. Das in den beiden Beispielen vorgestellte Lötergebnis soll an dieser Stelle anhand von Scherkraftmessungen der 2512- bzw. 1206-Bauelemente qualitativ bewertet werden. In Abbildung 6-21 ist daher der Vergleich der gemessenen Scherkräfte beider Lötbeispiele zu mittels Zwangskonvektion gelöteten Proben dargestellt.

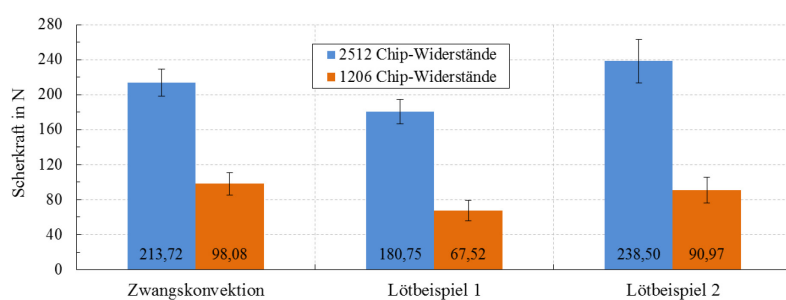


ABBILDUNG 6-21: GEMESSENE SCHERKRÄFTE AN RESISTIV GELÖTETEN BAUELEMENTEN (2512 UND 1206) IM VERGLEICH ZU KONVEKTIV GELÖTETEN KOMPONENTEN (LOT: SnBi58)

Die beiden vorgestellten Beispiele zeigen, dass es möglich ist, Lötprozesse mit einer durch integrierte Heizschichten beheizten Leiterplatte durchzuführen. Dabei ist eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung von Vorteil. Dies kann in späteren Anwendungen z.B. mit wärmespreizenden Kupferflächen zwischen Heizschicht und Löt-

Diskussion

seite erreicht werden. Die gemessenen Scherkräfte der unterschiedlich gefertigten Proben deuten zunächst auf einen gelungenen Lötprozess hin. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Versuchsproben können auf die unterschiedlichen Lötprofile und die ungleichmäßige Temperaturverteilung zurückgeführt werden. Einen klaren Zusammenhang zwischen Bauelementposition und Scherkraft ließ sich jedoch nicht erkennen. Ein entscheidendes Argument für das Löten mit resistiven Schichten lässt sich im gemessenen Energieverbrauch des Prozesses sehen. Für die Durchführung eines Lötprozesses mit SnBi58 wurden pro Segment ca. 3,8 kJ gemessen, womit sich für eine gesamte Testbaugruppe ein Energiebedarf von ungefähr 19 kJ ergibt. Dies deckt sich in der Größenordnung mit den rechnerischen Energieabschätzungen aus Abschnitt 3.2.2. Entsprechend dem Lötbeispiel 2 wurden außerdem Proben unter Grobvakuum (Exsikkator, Druck: ~188 mbar) erzeugt. Hierbei wurden je Segment lediglich 2,4 kJ an Energiebedarf gemessen, was auf einen deutlich geringeren Anteil von konvektiven Verlusten an den Proben zurückgeführt werden kann.

6.2.2 DEMONSTRATOREN FÜR ZUVERLÄSSIGKEITSCOUPONS

Im Grundlagenkapitel wurde bereits mehrfach der Einfluss von erhöhten Temperaturen auf eine Reihe von physikalischen Parametern bei elektronischen Baugruppen diskutiert. Im Bereich der Zuverlässigkeitsuntersuchungen ist es daher unabdingbar, dass verschiedene Belastungen und Prüfmethoden unter gezielter Zufuhr von Wärme an die Prüfobjekte durchgeführt werden. Üblicherweise erfolgt die Erwärmung der Prüflinge konvektiv in Öfen bzw. beheizbaren Testkammern oder durch weitere externe Anlagentechnik.

Erwärmung von
Prüflingen

Durch den Einsatz von integrierten Heizschichten, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden, eröffnen sich weitere Möglichkeiten der thermischen Belastung von entsprechenden Prüfbaugruppen. Mit einer endogen beheizten Prüfplatine lässt sich ein energetisch effizienteres Heizverfahren, das ausschließlich auf Wärmeleitprozessen am Objekt beruht, nutzen und es besteht die Option zur Einsparung von Anlagentechnik. Im Allgemeinen sind Testleiterplatten und Baugruppen in ihrem Aufbau deutlich weniger komplex als eine reale Baugruppe und werden stattdessen nach den Anforderungen des jeweiligen Prüfvorhabens entworfen. Für die meisten Testplatinen genügt daher eine einzelne Verdrahtungs-, Lotmaterial- und Bestückungsebene. Dies vereinfacht die Integration von entsprechenden vollflächigen Heizschichten in derartige Layouts.

Endogen Erwärmung
von Prüfleiterplatten

Auf Grundlage der Ergebnisse von den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird für Langzeituntersuchungen, wie z.B. thermische Alterungsprozesse von Testbaugruppen, die Verwendung von Heizschichten empfohlen, die eine geringe Drift

Heizschichtauswahl

bei den durchgeführten Langzeittests (wie z.B. NiP-Schichten) gezeigt haben. Wenn klimatische Belastungen mit definierter Feuchtigkeit durchgeführt werden, ist ein schützendes Einbetten der Heizschichten sinnvoll. Für kurzzeitige Testvorhaben, wie z.B. Scherkraftmessungen, ließe sich auch auf die etwas regelungsintensiveren Carbon-Schichten als Heizelement zurückgreifen.

In den beiden folgenden Abschnitten sollen abschließend noch zwei Beispiele für mögliche Zuverlässigkeitsuntersuchungen demonstriert werden. Es sei angemerkt, dass es sich bei den Methoden noch keineswegs um eine ausgereifte Prozessführung handelt. Vielmehr soll mit den Beispielen die generelle Anwendbarkeit sowie das Potential integrierter Heizsysteme veranschaulicht werden.

Demonstrator
Beispiele

6.2.2.1 SCHERKRAFTMESSUNGEN UNTER TEMPERATUREINFLUSS

Im ersten Demonstrator für Zuverlässigkeitsuntersuchungen soll die Scherkraftmessung bei erhöhten Lötstellentemperaturen mit aktiv beheizten Testcoupons beschrieben werden. In den Grundlagen zur Scherkraftmessung (Abschnitt 2.2.3) wurde bereits die Abhängigkeit der Scherkraft von der homologen Temperatur beschrieben. Demnach nimmt die Festigkeit von Lötverbindungen mit steigender Lötstellentemperatur ab. Die Untersuchung dieser Festigkeitswerte ist besonders für Lötstellen von Baugruppen, welche unter erhöhten statischen Temperaturbelastungen arbeiten müssen (z.B. Automotive), von Interesse. Um die erhöhten Temperaturen während der Scherkraftmessung auf die Lötverbindungen zu übertragen, ist ein komprimiertes Heizsystem notwendig. Einige Schertester verfügen über die Option, eine beheizte Probenhalterung in den Messaufbau zu integrieren. [302] Diese ermöglicht aber häufig keine Selektivität beim Probenbeheizen, und die Wärmeübertragung beruht (wie bei Heizplatten) auf einem punktuellen Kontakt zwischen den Grenzflächen.

Scherkraftmessung
unter
Temperatureinfluss

Stattdessen soll auf die Verwendung von integrierten Heizschichtsegmenten als Probenheizung für die Scherkraftmessung eingegangen werden. Hierfür wurden verschiedene Testlayouts entworfen, die in **Anhang N** abgebildet sind. Auf dem ‚Layout 1‘ wurden Dummy-Komponenten aus FR-4 mit unterschiedlichen Lotdepotgrößen verlötet. Jeweils fünf Dummies mit gleicher Lotfläche sind oberhalb eines NiP-Heizsegmentes angeordnet worden. Von dem ‚Layout 2‘ wurden vorrangig die Zweipoler (2512, 1206) für die Auswertung der Scherkräfte verwendet. Die verbleibenden Scherkräfte der größeren Komponenten überstiegen auch bei erhöhter homologer Temperatur häufig die Messgrenze des Kraftsensors und zeigten keine statistische Signifikanz.

Aufbau der Proben

Die Versuchsanordnung für den endogen beheizten Schertest ist in Abbildung 6-22 skizziert. Der Aufbau ist in den Prüfbereich des verwendeten Schertesters eingelassen.

Aufbau der Versuchsanordnung

Da die Proben mit einer freilegenden NiP-Heizschicht versehen waren, mussten elektrisch isolierende Stützstellen verwendet werden, um die Platine in z-Richtung zu fixieren. Auf den zu scherenden Komponenten wurden Thermoelemente befestigt, um die Schertemperatur erfassen zu können. Die Differenz zwischen der gemessenen Temperatur und der Temperatur im Lot beträgt dabei ca. 5 K bis 10 K. Für das Abscheren der Bauteile wurde eine konstante Schergeschwindigkeit von 166 $\mu\text{m/s}$ verwendet.

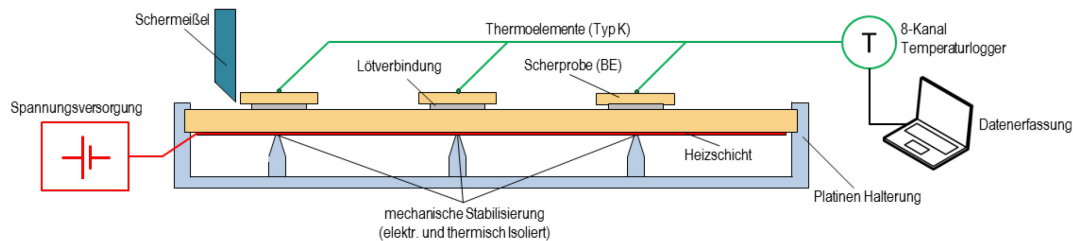


ABBILDUNG 6-22: TESTANORDNUNG FÜR SCHERKRAFTMESSUNGEN AN BEHEIZTEN PROBEN MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT

Bei der Versuchsdurchführung wurde so lange gewartet, bis die gemessene Temperatur, die durch das beheizte Segment hervorgerufen wurde, sich einen konstanten Wert angenähert hat. Anschließend ist mit der Scherkraftmessung der Probe begonnen worden. Eine exemplarische IR-Aufnahme des beheizten Testsegmentes ist in Abbildung 6-23 dargestellt.

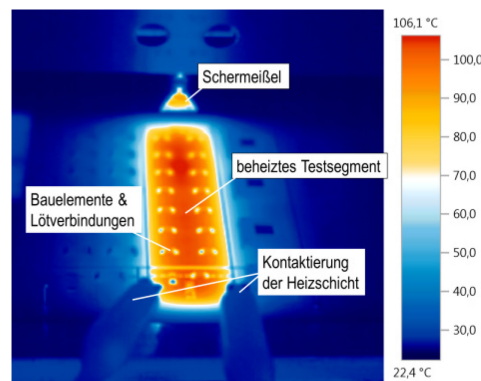


ABBILDUNG 6-23: IR-AUFNAHME EINES BEHEIZTEN SCHERTESTCOUPONS MIT INTEGRIERTER HEIZSCHICHT AUF RÜCKSEITE

Einige der gemessenen Scherkräfte von beheizten und unbeheizten Proben sind in Ergebnisse Abbildung 6-24 zusammengefasst. Auffällig ist, dass die mittleren Scherfestigkeiten der Dummy-Proben vom Layout 1 zwischen 22 °C und 110 °C einem nahezu linear abfallenden Verlauf unterliegen. Vergleicht man diese mit der qualitativen Grafik aus Abbildung 2-29, wird deutlich, dass zwischen einer homologen Temperatur von 0,6 und 0,8 ein Umkehrpunkt liegt. Da der hier untersuchte Temperaturbereich mit 90 °C zudem

relativ klein ist, ist denkbar, dass die gemessenen Werte im annähernd linear verlaufenden Bereich um den Umkehrpunkt liegen.

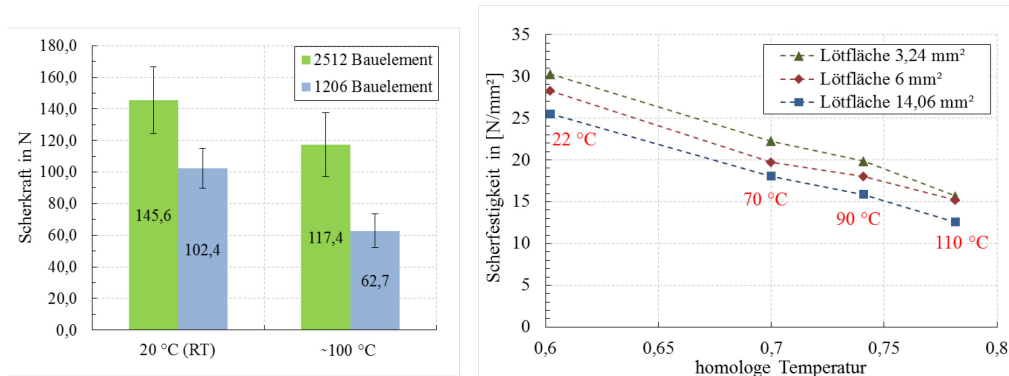


ABBILDUNG 6-24: GEMESSENE SCHERKRÄFTE AN BEHEIZTEN UND UNBEHEIZTEN TESTPLATINEN; ZWEIPOLER AUF LAYOUT 2 (LINKS); VERSCHIEDENE DUMMY-KOMPONENTEN AUF LAYOUT 1 (RECHTS)

Die für die Dummy-Komponenten dargestellten Scherfestigkeiten wurden auf die Fläche der Lötverbindung normiert. Es war anzunehmen, dass die Festigkeitswerte für alle Größen näherungsweise identisch sein sollten. Bei Röntgenuntersuchungen einiger vergleichbarer Proben war jedoch eine Reihe von Voids in den vergleichsweise großen Lötverbindungen erkennbar. Da durch diese die Gesamtfestigkeit reduziert wird, ist zu vermuten, dass in den größeren Gefügen ein höherer Voidanteil vorhanden war als in den kleineren.

Die Ergebnisse zeigen die aus der Theorie erwartete Abhängigkeit von Temperatur und Festigkeit für die verwendete SAC305-Lotlegierung und gehen mit den Messdaten aus [303] konform, wo ähnliche Untersuchungen durchgeführt wurden. Aus der Veröffentlichung ist jedoch nicht ersichtlich, wie die Erwärmung der Proben durchgeführt wurde, sondern es ist nur das Erreichen einer maximalen Temperatur von 120 °C beschrieben worden. Mit den integrierten Heizschichten sind durchaus höhere Messtemperaturen zu erreichen als die, die in diesem Beispiel vorgestellt wurden. Durch ein segmentweises Beheizen würden neben der aktuell zu scherenden Verbindungen aber auch die nachfolgenden Verbindungen diesen Temperaturen ausgesetzt sein. Gerade bei höheren Temperaturen ist es denkbar, dass dadurch bereits ein degradierender Effekt in den nachfolgenden Proben hervorgerufen wird. Für spätere Testaufbauten wird es daher als vorteilhaft angesehen, die Heizschicht so zu segmentieren, dass stets nur die aktuell zu scherende Verbindung direkt beheizt wird.

Diskussion

6.2.2.2 AKTIVE THERMISCHE ALTERUNG

Wie bereits im Kapitel 2.2.3 dargelegt wurde, ist die gezielte thermische Alterung von Testplatinen bzw. Baugruppen ein wichtiges Mittel der Zuverlässigkeitsanalyse. Neben dem Einsatz von Klima- oder Temperaturschockkammern werden auch aktive Belastungen durch gezielte Stromzufuhr durchgeführt. Ein Beispiel ist der Interconnect-Stress-Test (IST) [304], der zur Prüfung verschiedener Materialeigenschaften an speziellen Testcoupons genutzt wird, welche mit einer Heizwendel versehen sind, die während des Tests aktiv beheizt wird. Eine weitere Möglichkeit der aktiven Temperaturbelastung wird in [305] durch die elektrische Erwärmung von Chip-Widerständen für die thermo-mechanische Analyse der angebundenen Fügeverbindungen vorgestellt.

Aktive thermische
Alterung

Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen war es, zu zeigen, dass sich mit einer integrierten Heizschicht auch Methoden zur beschleunigten thermischen Alterung nachbilden lassen. Zu diesem Zweck wurden geeignete Proben gefertigt, die dann einer getakteten, zyklischen Belastung durch elektrisches Beheizen ausgesetzt wurden. Um typische Testparameter, wie z.B. Temperaturzyklen zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [306], nachstellen zu können, ist eine zusätzliche aktive Kühlung unterhalb der Raumtemperatur erforderlich. Erreichen ließe sich dies mit der Auslagerung des Testboards in einer entsprechenden Kühlkammer, wodurch das Einsparpotential einer Prüfkammer jedoch teilweise negiert werden würde. Aus diesem Grund wurde eine Temperaturwechselbelastung zwischen Umgebungstemperatur ($T_o \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) und einer Temperatur auf der Oberseite der Testplatinen von um die $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ gewählt. Die obere Temperaturgrenze der Zyklenbelastung lässt sich nicht exakt angeben, da die Temperaturverteilung inhomogen ist. Dies wird durch die Verwendungen unterschiedlich großer thermischer Massen (Bauelemente) verstärkt. Die Temperaturmessung während der Alterungszyklen (Abbildung 6-25) zeigt diese Unterschiede deutlich. Die Positionierung der einzelnen Thermoelemente ist in **Anhang O** zu finden.

Testbedingungen

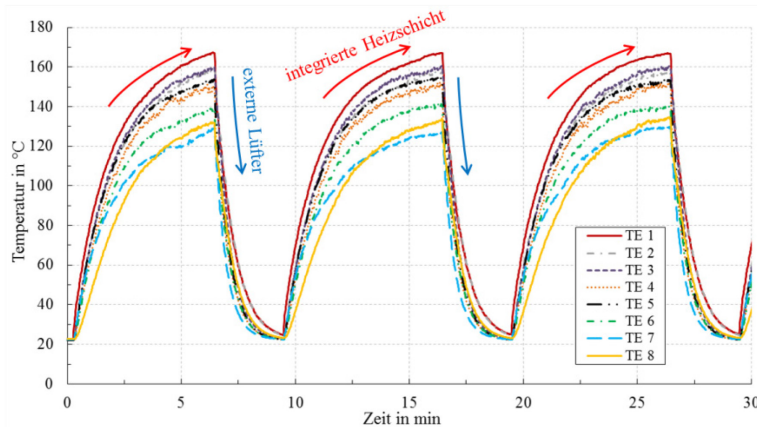


ABBILDUNG 6-25: GEMESSENE TEMPERATUREN AN AKTIV GEALTERTEN PROBEN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN (3 ZYKLEN)

Die Thermoelemente 4 – 7 befinden sich auf der Oberseite verschiedener bestückter Komponenten. Hier wurden bei der Erwärmung teils deutlich niedrigere Temperaturen (bis zu 20 K) gemessen als auf der Platinenoberseite.

Für die aktive thermische Alterung wurden ähnliche Proben verwendet wie in den Versuchen zur temperierten Scherkraftmessung. Der Probenaufbau kann ebenfalls **Anhang N** (Layout 2) entnommen werden. Als Heizschicht wurde auch hier die Verwendung einer freiliegenden NiP-Schicht favorisiert. Neben einer reproduzierbaren Applikation und Temperaturverteilung gegenüber den anderen Heizschichtvarianten lässt sich mit den NiP-Schichten ein unregelmäßiger Prozess am einfachsten durchführen. An den 2512- und 1206-Chip-Widerständen wurden vergleichende Scherkraftmessungen mit passiv und den hier aktiv gealterten Proben vorgenommen. Mit den Komponenten Dummy, MLF64 und D²PAK sollte untersucht werden, ob die entsprechend größeren Lötverbindungen dieser Bauelemente sich infolge der thermischen Alterung leichter abscheren lassen würden. Im Ausgangszustand waren die benötigten Scherkräfte zu hoch und konnten von der verwendeten Prüfanlage nicht aufgebracht werden.

Aufbau der Proben

Für die Durchführung des Versuches wurde ein Laboraufbau entsprechend der Skizze in Abbildung 6-26 verwendet. Um den Status der Alterung der Lötverbindungen anhand von Scherkraftmessungen bewerten zu können, wurden mehrere Testplatten parallel einer zyklischen Belastung unterzogen. Die einzelnen Heizschichten sind mittels Parallelschaltung an eine Konstantspannungsquelle angeschlossen (Heizkreis) worden. Zum Verkürzen der Abkühlphase der einzelnen Zyklen wurden Axiallüfter ($d = 120 \text{ mm}$) auf die Testplatten gerichtet, deren Versorgung über ein weiteres Labornetzteil realisiert wurde (Kühlkreis). Die Ansteuerung beider Quellen erfolgte über eine SPS, in der die gewünschte Zyklenanzahl sowie die Laufzeiten des Heiz- bzw. Kühlkreises einprogrammiert wurden.

Aufbau der Testumgebung

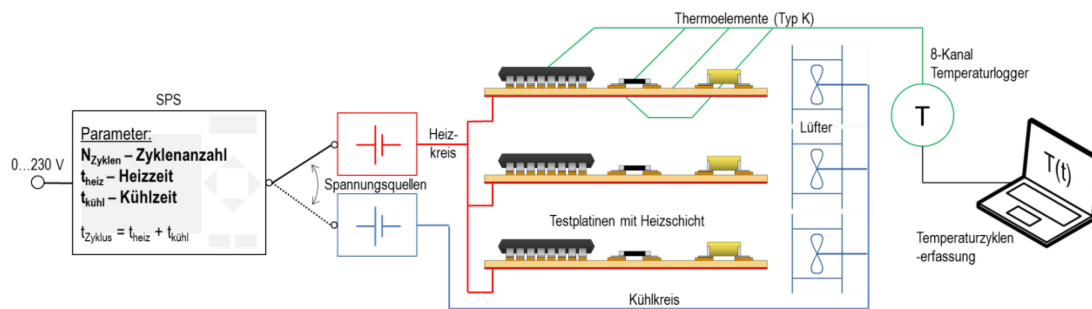


ABBILDUNG 6-26: TESTANORDNUNG FÜR EINE BESCHLEUNIGTE ALTERUNG VON PROBEN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN AN RAUMTEMPERATUR

Über die gesamte Prozessdauer wurde an einem der Testboards eine Temperaturmessung mit Hilfe von Thermoelementen durchgeführt. Durch diese erfolgte die Überwachung der Temperaturverteilung sowie der Langzeitstabilität der Zyklen-Temperaturen. Bereits in der Abbildung 6-25 war zu erkennen, dass an der Oberseite der Testbaugruppen ein Temperaturgradient zwischen Mitte und Rand sowie zur Oberseite der Komponenten entsteht. Dies zeigt sich auch in einer IR-Aufnahme von zwei beheizten Proben (Abbildung 6-27) während des Endes eines Heizzyklus deutlich.

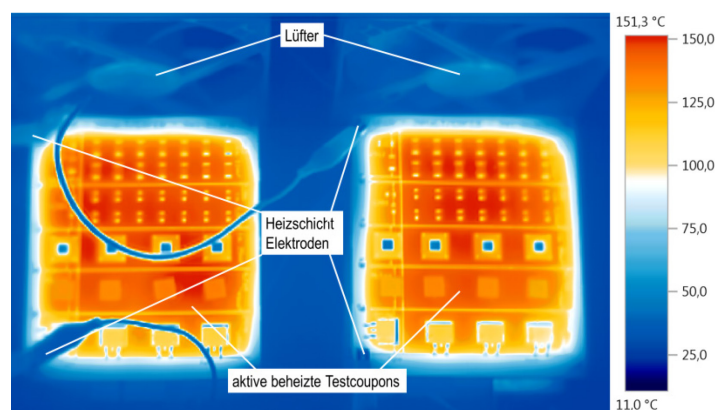


ABBILDUNG 6-27: IR-AUFNAHME VON AKTIV BEHEIZTEN TESTBAUGRUPPEN WÄHREND EINES ALTERUNGSZYKLUS

Die SPS wurde so programmiert, dass jeweils Proben nach 250 Zyklen, 500 Zyklen und nach 1000 Zyklen dem Heizkreis entnommen werden konnten.

Um bewerten zu können, ob und wie ausgeprägt eine thermische Alterung durch die aktiven Zyklen in den Lötstellen induziert wurde, sind die Zweipoler der entnommenen Proben auf ihre verbleibende Scherfestigkeit hin untersucht worden. Als Referenz erfolgte die Abscherung identischer Testplatten direkt nach der Fertigung (Ausgangszustand) sowie nach einer passiven Alterung mit einem Temperaturschockschrank. Die passiven Temperaturzyklen wurden mit 20-minütigen Zyklen von 20 °C (Kaltkammer) und 150 °C (Warmkammer) durchgeführt. In Abbildung 6-28 sind die vergleichenden Ergebnisse der Scherkraftmessungen mit den Referenzen dargestellt.

Ergebnisse

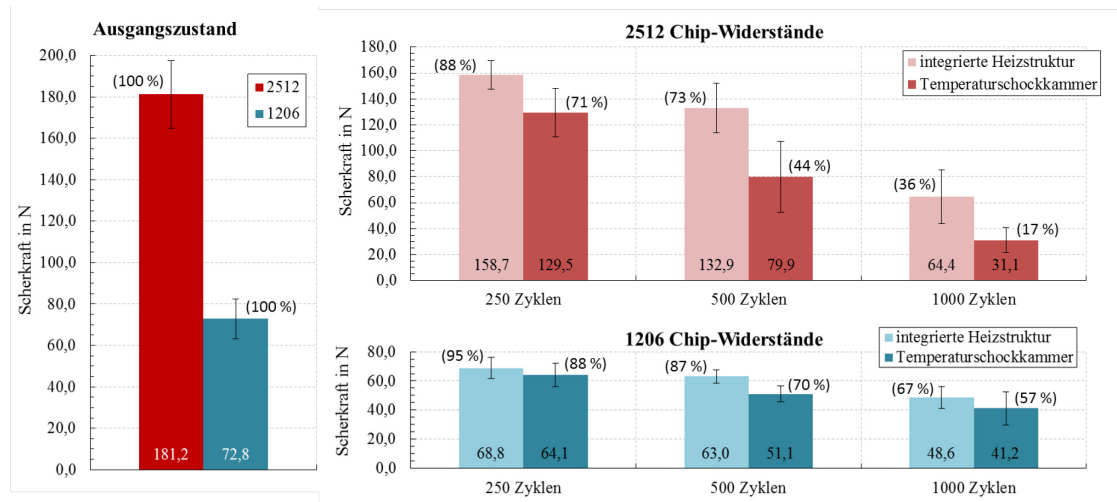


ABBILDUNG 6-28: GEMESSENE SCHERKRÄFTE VON GELÖTETEN (SAC305 / DAMPFPHASE) 2512 UND 1206 CHIP-WIDERSTÄNDEN IM AUSGANGSZUSTAND (LINKS) UND NACH EINER BESCHLEUNIGTEN ALTERUNG (RECHTS)

Mit den Messungen war für beide Alterungsmethoden ein scherkraftverringender Einfluss auf die Lötverbindungen nachzuweisen. Erwartungsgemäß nehmen die Restscherfestigkeiten für die größeren 2512-Komponenten mit steigender Zyklenanzahl stärker ab als die der kleineren 1206-Bauelemente. Deutlich zu erkennen ist auch der Unterschied zwischen den aktiv gealterten Proben mit einer integrierten Heizschicht und den passiv gealterten Proben im Temperaturschockschrank. Die niedrigeren Scherkräfte der passiven Varianten deuten auf eine stärkere Alterung dieser Proben hin. Eine Abhängigkeit der verbleibenden Scherkraft der aktiv gealterten Komponenten von ihrer Position auf den Testplatinen (Randbereich oder Zentrum) konnte nicht festgestellt werden.

Die Unterschiede bei den Alterungszuständen zwischen den aktiv und passiv gezykelten Proben werden auf die unterschiedlich gewählten Haltezeiten während der einzelnen Zyklen und auf die unterschiedlichen Arten der Wärmeverteilung und Durchwärmung der Proben zurückgeführt. Aus einer theoretischen Vorbetrachtung ließe sich sogar erwarten, dass die Alterung von Proben mit einer endogenen Erwärmung des Substrates (an Raumtemperatur) schärfer ist als bei einer gleichmäßigen konvektiven Durchwärmung (im isothermen Ofen). Dadurch, dass die Bauelemente bei der aktiven Variante kälter bleiben als das Substratmaterial, ist der Unterschied in der thermischen Ausdehnung beider Komponenten größer als bei gleicher Temperatur von Bauelement und Substratmaterial. Die thermomechanischen Spannungen auf die Fügeverbindung sollten bei der aktiven Zyklierung daher größer sein. In dem hier vorgestellten Beispiel wurde dieser Effekt möglicherweise durch die Unterschiede in der Prozessierung überlagert.

Diskussion

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Als Ziel dieser Arbeit wurden die Untersuchung der technologischen Realisierbarkeit von integrierten Heizschichten sowie die Vorstellung demonstrativer Anwendungen, als funktionellen Nachweis, für endogen erwärmbare Leiterplatten genannt. Im theoretischen Teil dieser Dissertation sind zunächst theoretische Möglichkeiten zur endogenen Erwärmung von Leiterplatten recherchiert und diskutiert worden. Dabei standen effiziente sowie möglichst vielseitig einsetzbare Methoden im Fokus. Im Rahmen einer Abschätzung zum Verwendungspotential integrierter Heizschichten wurde auf verschiedene Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Leiterplatten- und Baugruppenfertigung, sowie Einsatzmöglichkeiten im Betrieb (z.B. Wartung, Reparatur,...) für ein sich endogen erwärmendes System eingegangen. Mit der hieraus abgeleiteten Anforderung an ein sowohl global, als auch selektiv verwendbares Heizsystem wurde sich für die genauere Untersuchung sowohl von induktiv als auch von resistiv heizenden Strukturen entschieden. Der Lösungsweg mit resistiven Schichten ist dabei als primär angesehen worden, da dessen technische Umsetzung als anwendungsorientierter einzustufen ist.

Zusammenfassung -
Allgemein

Die grundlagenorientierte Untersuchung von induktiven Heizmethoden erfolgte mit speziellen Laboraufbauten. Das Prinzip des induktiven Heizens beruht auf der Einkopplung elektromagnetischer Felder in geeignete Suszeptormaterialien, die als zusätzliche Schicht in die Leiterplatte integriert werden. Die kontaktlose Energieübertragung stellt dabei einen der Vorteile induktiver Methoden gegenüber resistiven Verfahren dar. Als benötigte Suszeptormaterialien kommen alle metallischen Stoffe in Frage, deren Permeabilitäten bei den jeweiligen Feldfrequenzen eine ausreichende Eigenerwärmung infolge von Wirbelstrom-, Hysteres- und Anomalieverlusten aufweisen. Als Versuchsaufbauten dienten ein Flachspuleninduktor (mit 20 kHz), dessen Querfeldkomponente genutzt wurde um vorrangig dia- bzw. paramagnetische Suszeptoren aus Aluminium und Kupfer zu untersuchen, sowie ein Zylinderspuleninduktor (mit 100 kHz), dessen Längsfeldkomponente für die Erwärmung ferromagnetischer Suszeptoren aus Eisen, Nickel sowie verschiedener ferromagnetischer Legierungen genutzt wurde. Mit der Auswahl der jeweiligen Feldfrequenzen sollte gleichzeitig eine nicht gewollte Einkopplung in die meisten typischen Cu-Leiterbild-Strukturen auf Leiterplatten vermieden werden. Als variierbare Einflussfaktoren auf die Größe der induktiven Erwärmung in einkoppelnden Strukturen, wurden neben den feldseitigen Parametern (wie z.B. Frequenz und Flussdichte) und den physikalischen Materialparametern, vor allem die geometrischen Abmessungen (Kantenlänge und Schichtdicke) der Suszeptoren identifiziert. Im Querfeld konnten mit ca. 100 µm dicken Suszeptoren aus Kupfer bzw. Aluminium und den Abmessungen 20 mm x 20 mm Temperaturen bis zu 250 °C auf Leiter-

Zusammenfassung -
Induktives Heizen

plattenproben erreicht werden. Diesen Temperaturbereich erhielt man im Längsfeld mit ca. 20 mm x 25 mm großen Suszeptoren aus 60 µm bis 100 µm dicken Nickel- bzw. 100 µm dicken Eisenschichten. Die Verwendung größerer Suszeptoren war auf Grund der gegebenen Feldgeometrien der Versuchsstände nicht möglich. Aus numerischen Simulationen, mit welchen die induktiven Experimente (Variation von Materialtyp, Dicke, sowie Länge und Breite) unterstützt wurden, war zu erkennen, dass mit größeren x-y-Abmessungen auch höhere Temperaturen erreicht werden könnten. Dem entgegen steht jedoch eine ungleichmäßigere Temperaturverteilung, welche sich infolge der Erwärmung vom Rand zur Mitte bei Querfeldsuszeptoren bzw. von der Mitte zum Rand bei Längsfeldsuszeptoren ergibt. Eine Verwendung von größeren x-y-Abmessungen wird daher als wenig zielführend im Sinne einer möglichst homogenen Temperaturverteilung gesehen. Die grundlegende Eignung des suszeptorbasierten Induktionsheizens für Lötanwendungen wurde mit jeweils einem einfachen Prozessbeispiel für das Transversal- sowie für das Longitudinalfeld demonstriert.

Für die Anwendung der hier untersuchten Methoden zur induktiven Erwärmung mittels Suszeptoren auf herkömmlichen Leiterplatten wird die Verwendung anderer Induktorgeometrien empfohlen. Diese müssen in der Lage sein, eine konstante Feldausrichtung sowie konstante Feldstärke über die zu erwärmende Fläche der jeweiligen Probe zu erreichen. In Abbildung 7-1 sind einige Beispiele für derartige Induktoren abgebildet, die bereits in der Erwärmung von Blechen oder Formteilen industriell Anwendung finden.

Ausblick - Induktives
Heizen auf
Leiterplatten

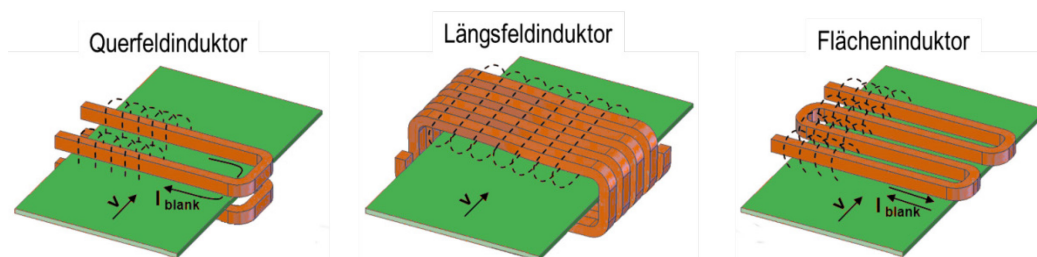


ABBILDUNG 7-1: BEISPIELE FÜR VERSCHIEDENE INDUKTORGEOMETRIEN ZUR INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON FLÄCHIGEN PROBEN IM DURCHLAUFVERFAHREN (NACH [214])

Ein Vorteil bei der Verwendung von Querfeldinduktoren ist in dem möglichen Einsatz von Kupferschichten als suszeptive Strukturen zu sehen. Die Verwendung von ferromagnetischen Materialien in Kombination mit Längsfeldinduktoren eröffnet dagegen größere Freiheitsgrade bei der Anpassung der Feldfrequenz und bietet das Potential der Ausnutzung vom Curiepunkt (des jeweiligen Stoffes) zur Temperaturbegrenzung. Es bleibt jedoch die Notwendigkeit, die verwendeten elektronischen Komponenten im Vorfeld auf ihr Potential zur Feldeinkopplung und dem daraus resultierenden Scha-

densrisiko (in Abhängigkeit von Feldgeometrie und Frequenz) zu untersuchen. Eine alternative Anwendungsvariante, die in weiterführenden Arbeiten untersucht werden soll, ist in Abbildung 7-2 skizziert. Hierbei sollen die suszeptiven Materialien nicht in das Trägermaterial integriert werden, sondern sie liegen als applizierbare Lot-Preform/Suszeptor-Kombination vor.

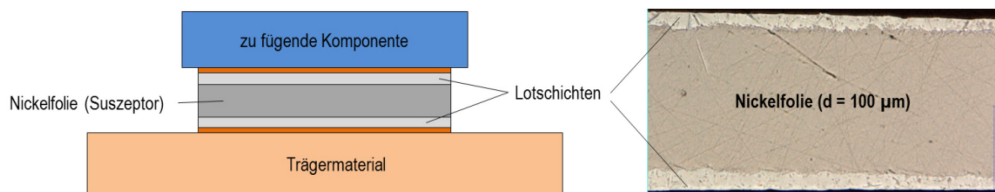


ABBILDUNG 7-2: PRINZIPDARSTELLUNG ZUR VERWENDUNG VON LOT-PREFORM/SUSCEPTORFOLIEN (BSP.: NICKEL) ZUM INDUKTIVEN LÖTEN VON GROSSFLÄCHIGEN KOMPONENTEN (LINKS); QUERSCHNITT EINER VORBELOTETEN (TAUHLÖTEN) NICKELFOLIE (RECHTS)

Ähnlich der Verwendung von reaktiven Lotfolien [162] können diese zum selektiven Fügen spezieller flächiger Komponenten (z.B. Kühlkörper) eingesetzt werden. Als Suszeptormaterial würde sich z.B. Nickel anbieten, da dessen Einsatz in der Elektronik etabliert ist und es mit entsprechenden Verfahren vorbelotet werden kann.

Die Untersuchungen zum resistiven Heizen beruhen vorrangig auf der Verwendung von vollflächigen Widerstandsschichten, bei denen infolge eines Stromflusses eine Joulesche Erwärmung stattfindet. Die notwendige Größenordnung dieser thermischen Verluste an einer Heizschicht, integriert in eine Leiterplatte, wurde in den Vorbetrachtungen auf $1 \frac{W}{cm^2}$ bis $2 \frac{W}{cm^2}$ geschätzt. Für die elektrische Versorgung sind Höchstwerte von 60 V und 10 A für Gleichspannung und Gleichstrom veranschlagt worden. Aus diesen Vorgaben wurde, mit Hinblick auf Leiterplattengrößen kleiner als das Doppelleuropapformat, ein sinnvoller Flächenwiderstandsbereich der resistiven Schicht von ca. $5 \Omega/\square$ bis ca. $80 \Omega/\square$ definiert. Für die Charakterisierung integrierter Heizschichten und deren Verarbeitbarkeit in einem technologischen Fertigungsprozess für Leiterplatten, erfolgte die Auswahl folgender Materialien als zu untersuchende Heizsysteme:

- eine Polyimid-Folie (d ~ 25 µm) mit einer leitfähigen Carbon/Polyimid-Schicht (d ~ 25 µm)
- eine Kupferfolie (d ~ 18 µm) mit einer Nickel-Phosphor-Beschichtung (d ~ 400 nm)
- verschiedene Carbon/Polymer-Gemische (Lacke, Pasten)

Die mit nanoskaligen Ruß-Partikeln gefüllte Polyimid-Schicht besitzt zwar einen relativ hohen Flächenwiderstand ($\sim 100 \Omega/\square$) hat aber den Vorteil einer hohen thermischen Beständigkeit auf Grund der PI-Matrix. Deren chemische Beständigkeit verhindert al-

Zusammenfassung –
Resistives Heizen

Zusammenfassung –
C/PI-Folie

lerdings ein Entfernen der nichtleitfähigen PI-Seite der Folie (mit geeigneten Ätzmitteln). Mittels Laminierprozessen konnte die Folie auf bzw. in Basismaterialien appliziert werden. Hierbei haben die Versuche häufig eine ungenügende Haftung der PI/C-Folie mit dem Prepreg gezeigt. Des Weiteren müssen zusätzliche Prozesse eingesetzt werden, um eine gute elektrische Ankontaktierung der carbongefüllten PI-Schicht mit flächigen Elektroden herzustellen (z.B. galvanische Verkupferung). In aktiven Heizversuchen (bis 200 °C) zeigten die resistiven Schichten ein messbares NTC-Verhalten, dessen annähernd linearer Verlauf (im gemessenen T-Bereich) auf eine Überlagerung von Tunneleffekt (NTC) und thermischer Expansion der Polymermatrix (PTC) zurückgeführt wird. Für den Einsatz als integrierte Heizschicht wird die C/PI-Folie auf Grund der erhöhten technologischen Prozessanforderungen und des für Heizanwendungen ungünstigen NTC-Verhaltens nicht favorisiert. Erwähnt seien an dieser Stelle auch die erhöhten Kosten, die anhand von Listenpreisen ermittelt wurden. Nach [307] belaufen sich die Kosten für 1 cm² dieser Folie auf ca. 0,26 €. Für den vollflächigen Einsatz der Carbon/Polyimid-Folie als (einzelne) Heizschicht auf einer Doppeleuropaformat-Platine würden demnach ca. 97,00 € pro Platine als reine Materialkosten anfallen.

Als weitere Materialklasse wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene pastöse Carbon-Verbundwerkstoffe untersucht, deren elektrische Leitfähigkeit sich aus einer Mischung von nanoskaligen Carbon-Füllstoffen und Carbon-Partikeln im Mikrometerbereich ergibt, nachdem deren Polymermatrix ausgehärtet und vernetzt wurde. Es kamen verschiedene Harzsysteme (z.B. Acrylat, Epoxid, ...) zum Einsatz. Für die Applikation der verschiedenen Gemische auf Basismaterialien wurden unterschiedliche Auftragsverfahren untersucht, von denen der Siebdruck als, geeignetes Verfahren identifiziert wurde. Zwar konnten mit dem Siebdruck bessere Druckergebnisse erzielt werden, als z.B. mit dem Schablonendruck, dennoch besteht für weiterführende Anwendungen optimierungsbedarf an die Druckeigenschaften der Verbundwerkstoffe. Einschränkungen haben sich durch eine stark begrenzte Topfzeit der Stoffe und eine steigende Verunreinigung der Siebe bei mehreren aufeinander folgenden Seriendruckern ergeben. Die Druckprozesse weisen dadurch eine ungenügende Reproduzierbarkeit auf und erfordern einen gesteigerten Reinigungsaufwand der Druck-Ausrüstung. Unterschiede haben sich auch bei der Schichthomogenität zwischen den einzelnen Materialsystemen gezeigt. Bei relativ großflächigen Heizschichten, wie sie hier untersucht wurden, wirken sich lokale Schichtdickenunterschiede direkt auf die Homogenität der Temperaturverteilung beim resistiven Heizen aus. Die besten Ergebnisse konnten mit den Gemischen CP-1 und CP-2 erzielt werden. Für die Ankontaktierung hat sich das Überdrucken von Kupferleiterzügen (als Heizschicht-Elektroden) auf den Testleiterplatten bewährt. Mit Laminierprozessen wurde die Einbettmöglichkeit der ausgehärteten Carbon-

Zusammenfassung –
Carbon-Gemische

Schichten in Leiterplatten durchgeführt. Durch die längere thermische (und mechanische) Belastung der verschiedenen Polymermatrizen beim Laminieren konnte bei allen verwendeten Schichtsystemen eine deutliche Veränderung der Schichtwiderstände gemessen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der maximal verwendeten Temperatur von 210 °C (Pressen) die Glasübergangstemperaturen/Schmelztemperaturen der vorliegenden Polymere überschritten wurden, wodurch es entweder zu weiteren Vernetzungen oder möglicherweise zu degradierenden Effekten in den Polymeren kam. Dementsprechend unterliegen die elektrischen Widerstände der leitfähigen Polymerschichten auch im aktiven Einsatz einer starken Temperaturabhängigkeit. Im geforderten Temperaturbereich (~ 20 °C bis 250 °C) kommt es zu einer Überlagerung mehrerer Effekte (Expansion der Matrix, Tunneleffekt, Erweichen der Matrix, Aggregation der Partikel), die sich unterschiedlich (PTC, NTC) auf die Widerstandsverläufe bei der Erwärmung auswirken. Außerdem sind die Materialien CP-3 und CP-5 bereits unter dem normalen Raumklima sehr feuchteaffin, und das wirkt sich zusätzlich auf den Widerstand aus. Unter erhöhten klimatischen Belastungen zeigen alle Carbon-Gemische eine unterschiedlich starke Abhängigkeit von Umgebungsfeuchte. Das Einbetten der Schichten hat hierbei eine schützende Wirkung gegenüber freiliegenden Strukturen gezeigt.

Die metallische Widerstandsschicht besteht aus einer dünnen (~400 nm) NiP-Legierung, welche als vollflächige elektrolytische Beschichtung auf einer Cu-Trägerfolie vorliegt. Um das NiP als resistive Heizschicht nutzen zu können, muss die Folie zunächst (mit der NiP-Seite) auf Leiterplatten-Basismaterial auflaminiert werden. Durch die ätztechnische Strukturierung (alkalisch) des Kupfers konnte die NiP-Heizschicht in der gewünschten Geometrie freigelegt werden. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass eine weitere Strukturierung der Heizschicht entweder mit einer speziellen Ätzlösung (CuSO₄) oder alternativ mit Laserstrahlabtrag erfolgen kann. Ein Vorteil der NiP/Kupfer-Kombination ist, dass sich aus dem Trägermaterial die Cu-Elektroden zur Kontaktierung der Heizschicht erzeugen lassen, welche wiederum mit Standardprozessen der AVT (z.B. Durchkontaktieren, Löten) verarbeitet werden können. Mit weiteren Laminierschritten lassen sich die hergestellten NiP-Heizschichten, im Mehrlagenaufbau einer Leiterplatte, einbetten. Es konnte festgestellt werden, dass thermische Prozesse eine irreversible Änderung (Verringerung) des spezifischen elektrischen Widerstandes im Nickel-Phosphor bewirken. Dieser Effekt wird auf Änderungen in der Mikrostruktur (Rekristallisation) der Widerstandslegierung, infolge von Temperprozessen zurückgeführt. Sobald diese Gefügeänderung abgeschlossen war, konnte an den gemessenen NiP-Schichten ein nahezu linearer Temperaturkoeffizient bestimmt werden. An den meisten der hier untersuchten NiP-Proben konnte ein positiver Temperaturkoeffizient

Zusammenfassung –
NiP-Schicht

nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu den Carbon-Werkstoffen, zeigten klimatische Belastungen keinen nennenswerten Einfluss auf die NiP-Schichten. Insgesamt konnten mit dem NiP-Heizschichten gut reproduzierbare Strukturgeometrien und stabile Widerstandsverläufe erreicht werden. Die weitere Nutzung dieser Heizschichtvariante wird daher für weitere Anwendungen favorisiert. Die aus den vorhandenen Daten abschätzbaren Materialkosten betragen ca. 0,06 € je cm² (\pm 22,40 € pro Doppeleuropaformat-Platine).

Für eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit bei der Applikation der Carbon-Gemische besteht weiterer Optimierungsbedarf bei den Prozessabläufen des Siebdruckes (z.B. Verunreinigung der Siebe) und den Topfzeiten der Pasten. Für die Verwendung als Heizschicht, wird auf Grund der Nichtlinearität des temperaturabhängigen Widerstandes eine leistungsbasierte Regelung empfohlen. Um die Temperaturbeständigkeiten der Polymermatrizen der Carbon-Schichten zu erhöhen sollte untersucht werden, inwieweit die Polymere mit Hoch- T_G Materialien substituiert werden können. Dies ließe sich mit der Verwendung spezieller Reaktionsbeschleuniger, wie sie in [308] beschrieben werden, kombinieren, um die thermischen Belastungen beim Aushärten der Schichten auf Leiterplatten möglichst gering zu halten.

Ausblick – Resistives
Heizen auf
Leiterplatten

Für die Abbildung von Fertigungsprozessen auf Leiterplatten und Baugruppen werden segmentierte Heizschichten einer einzelnen vollflächigen Struktur vorgezogen. Durch eine segmentweise Abstimmung der erreichbaren thermischen Verlustleistung (je Heizsegment) ließen sich unterschiedliche thermische Massen auf der Platine ausgleichen bzw. selektive Prozesse durchführen. So könnte z.B. in Segmenten, welche unterhalb von massereichen Bauteilen (große Wärmekapazität) liegen, höhere Verlustleistungen umgesetzt werden als in Segmenten von nicht-bestückten Baugruppenbereichen. Ermöglichen ließe sich dies durch eine starre Anpassung der Segmente beim Applizieren (unterschiedliche Segmentwiderstände) oder eine flexible Anpassung im Prozess mittels separat ansteuerbaren Segmenten (Verdrahtungsaufwand).

Die funktionale Erweiterung von Prüfkörpern mit integrierten Heizschichten (segmentiert oder vollflächig) wird als potentielle Anwendungsmöglichkeit und als Anknüpfungspunkt für wissenschaftliche Folgearbeiten gesehen. Ähnlich dem beschriebenen Anwendungsbeispiel für eine endogen beheizte Messung der Restscherfestigkeit von Lötverbindungen, wird Potential für die Abbildung weiterer kombinierter Testmethoden durch den Einsatz von integrierten Heizschichten gesehen. Neben elektro-thermischen Prüfverfahren, wie z.B. dem IST, wäre auch die Anwendung für elektro-mechanische Prüfmethoden, wie sie z.B. in [309] und [310] vorgestellt werden, denkbar. Die Prinzipdarstellung einer solchen kombinierten Testmethode ist in Abbildung 7-3, mit der endogenen Probenbeheizung auf einem Vibrationsprüfstand, dargestellt.

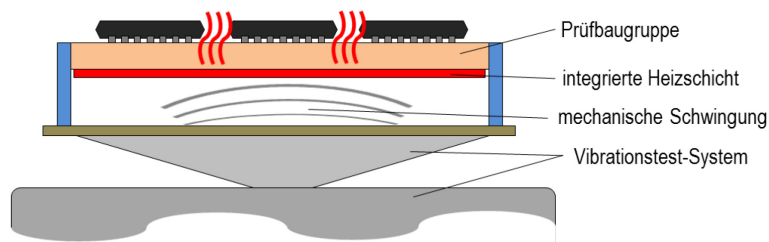
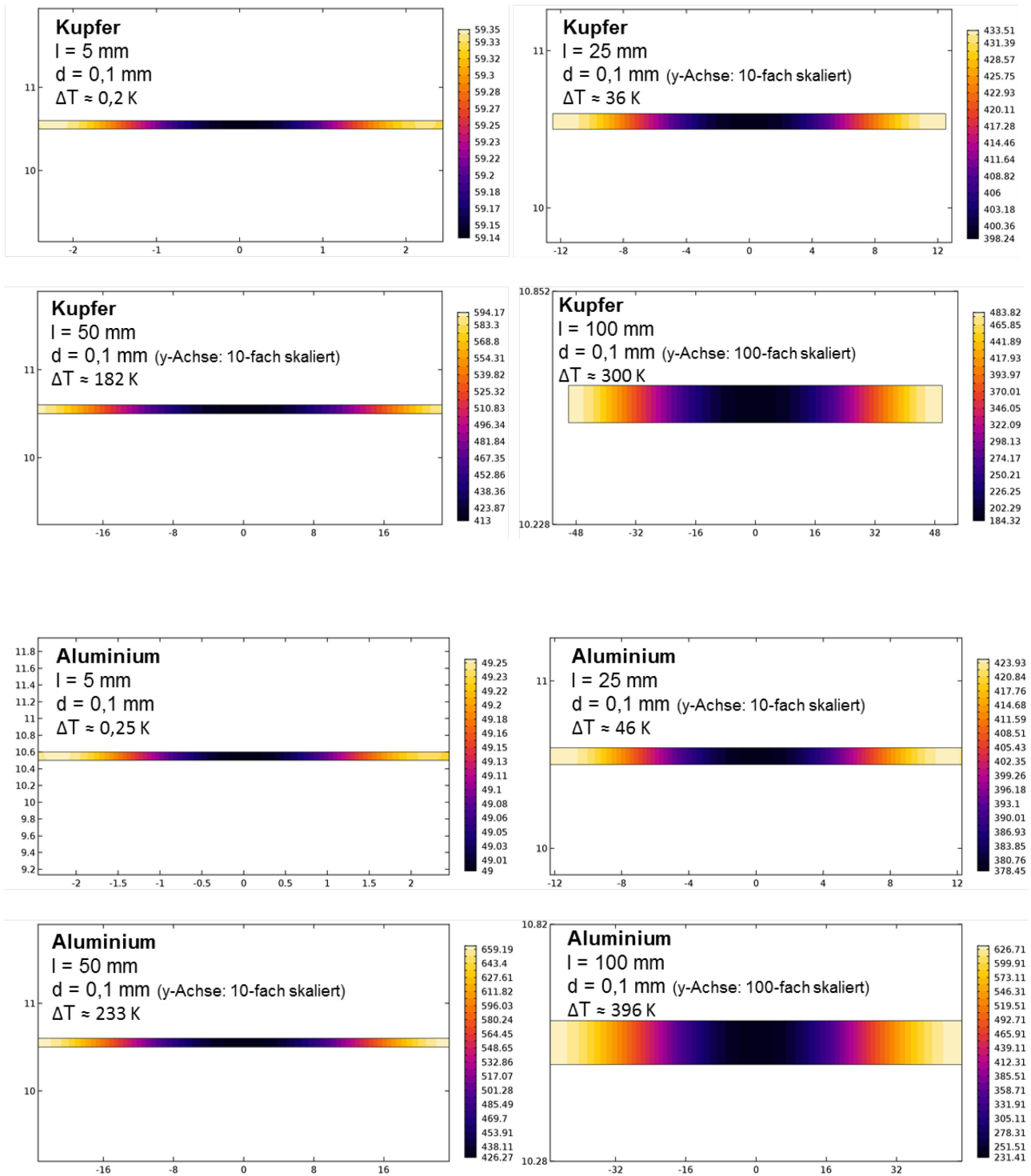


ABBILDUNG 7-3: BEISPIEL FÜR EIN KOMBINIERTES THERMISCH-MECHANISCHES PRÜFVERFAHREN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN

Die generelle Eignung mit integrierten Heizschichten Temperaturwechseltests durchzuführen, konnte in einem Beispiel gezeigt werden. Hier sind systematischere Untersuchungen notwendig, um zu prüfen inwieweit die endogene Heizmethode Unterschiede im zeitlichen und örtlichen Auftreten von Schädigungen, gegenüber exogenen Temperaturbelastungen ergibt.

ANHANG A: TEMPERATURVERTEILUNG IN SUSZEPTOREN IM QUERFELD NACH 150 S (SIMULIERT)

ANHANG B: BERECHNUNG DER VERLUSTKOEFFIZIENTEN FÜR DIE BESTIMMUNG DER GESAMTVERLUSTE IM MAGNETISCHEN WECHSELFELD

Die im Simulationstool berechneten Wechselstromverluste beschreiben nur einen Teil von den, in ferromagnetischen Materialien, hervorgerufenen Verlustleistungen. Um vergleichbarere Ergebnisse berechnen zu können, müssen in dem Modell daher auch Anomalie- und Hystereseverluste berücksichtigt werden. Eine exakte Simulation der Hystereseverluste wurde in dieser Arbeit nicht angestrebt da die benötigten Materialparameter von vielen Faktoren, wie z.B. der Materialbearbeitung und der Flussdichte abhängen und folglich große Abweichungen zwischen simulierten Daten und praktischen Messwerten zu erwarten sind. [311] Daher soll an dieser Stelle eine Abschätzung der weiteren Verlustanteile nach der in (Gl. 4-7) dargestellten Verlusttheorie genügen. Um die Gleichung aufzulösen, ist die Bestimmung der Koeffizienten k_h, n, k_w und k_a notwendig. Für die Bestimmung von k_w kann das vorhandene Simulationsmodell verwendet werden, da dieses die Wirbelstromverluste bereits errechnet. Dafür wurden mit dem Modell die Wirbelstromverlustleistungen P_w bei unterschiedlichen Frequenzen und Flussdichten berechnet und entsprechend in (Gl. 4-5) eingesetzt. Der gemittelte Wirbelstromkoeffizient betrug dabei $k_w = 6,1736 \cdot 10^{-6}$. Aus Datenblättern spezieller ferromagnetischer Materialien [209] lassen sich zudem häufig Werte für die Gesamtverluste P_{ges} in Abhängigkeit von f und B entnehmen. Mit diesen Daten, für mindestens drei Stützstellen, sind die übrigen Koeffizienten nach

$$P_{ges}(f, B) - k_w \cdot f^2 \cdot B^2 = k_h \cdot f \cdot B^n + k_a \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (\text{Gl. 0-1})$$

zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass die Wahl der Stützstellen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat. Dies wird auch in [189] beschrieben und kann somit zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen sowie großen Abweichungen bei der Berechnung der Eisenverluste führen. Für das hier verwendete Simulationsmodell bilden die Daten für das Material 20PNF1500 ($d = 200 \mu\text{m}$) aus [209] die Berechnungsgrundlage, da es nach [311] einen guten Kompromiss zwischen verlustreichem, reinem Eisen und optimierten Elektroblech-Legierungen darstellt. Zum Vergleich ist die Berechnung außerdem für das Material Permenorm 3601 (Ni36Fe) [312] durchgeführt worden. Die Stützstellen sowie die Lösungen für die Beispiele sind in Tabelle A-1 zusammengefasst dargestellt.

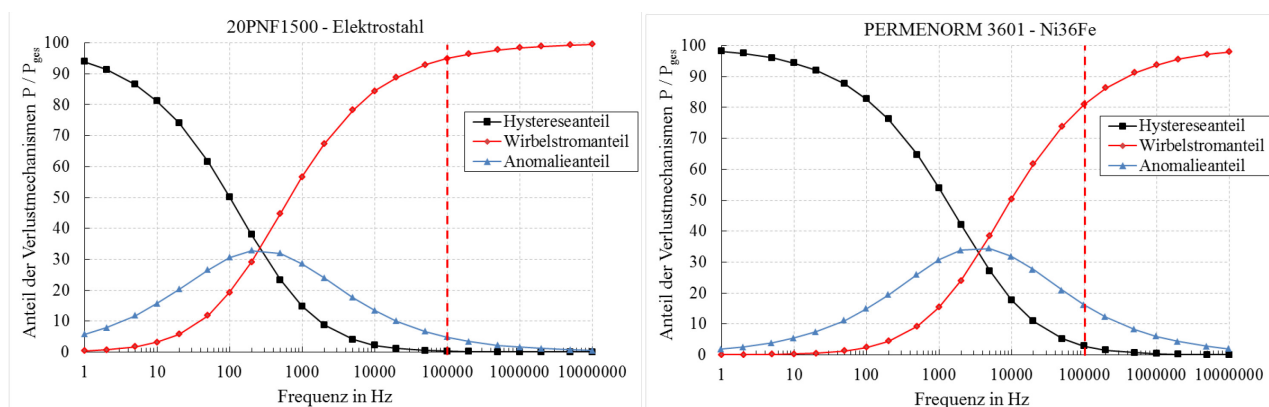
TABELLE A-1: BEISPIELE FÜR BERECHNETE VERLUSTKOEFFIZIENTEN MIT HILFE VON STÜTZSTELLEN AUS DATENBLÄTTERN

Stützstellen	20PNF1500 (d = 200 µm)			PERMENORM 3601 (d = 200 µm)		
Flussdichte, B [T]	1	1,5	1	1	1	1
Frequenz, f [Hz]	50	60	400	50	100	1000
Gesamtverluste, P_{ges} [W/kg]	1,24	3,28	12,8	0,227	0,553	18,9
Anteile der Verluste						
Wirbelstromverluste, P_w [W/kg]	0,01543401	0,05000619	0,98777665	0,026843709	0,107374837	10,73748372
Hysteres- und Anomalieanteil, $P_h + P_a$ [W/kg]	1,22456599	3,22999381	11,8122233	0,200156291	0,445625163	8,162516275
Koeffizienten	k_h	n	k_a	k_h	n	k_a
Lösungen	0,0217	1,9686	3,8976E-04	0,0028	1	1,71E-04

Mit Hilfe dieser Daten kann in dem Simulationsmodell eine zusätzliche Wärmequelle definiert werden, deren Leistungsumsatz sich aus den Hysteres- und Anomalieanteilen zusammensetzt. Hierbei muss aber beachtet werden, dass die berechneten Koeffizienten streng genommen nur für die jeweilige Materialstärke gelten, für welche die Stützstellen aus den Datenblättern entnommen wurden. Zum Vergleich ergibt eine Berechnung mit Stützstellen für ein 0,35 µm dickes Permenorm 3601 Blech die Koeffizienten $k_h = 0,0029$, $n = 1$ und $k_a = 1,82E - 04$.

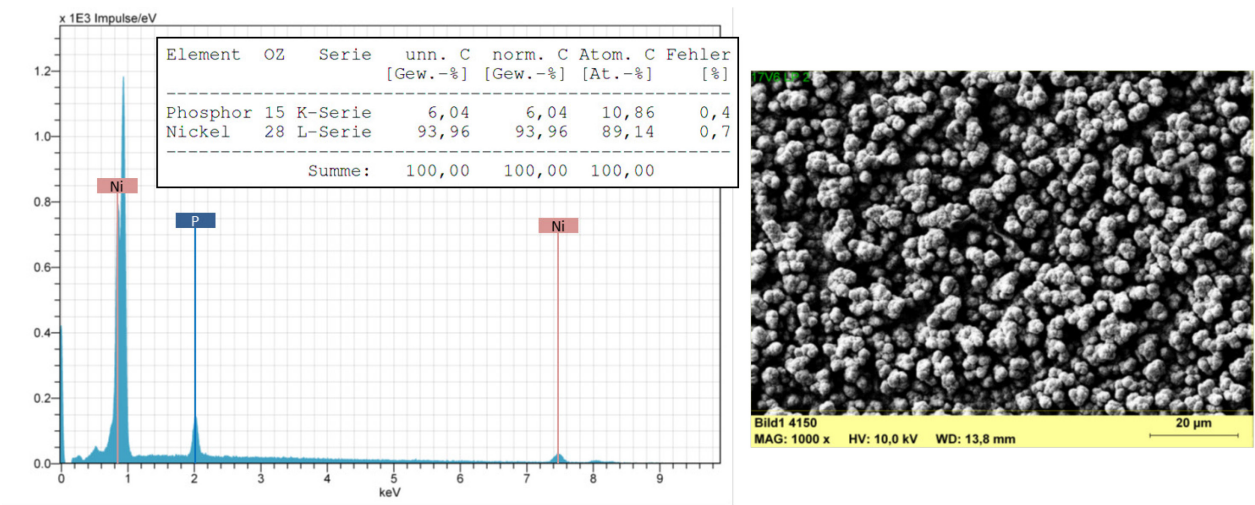
Mit Hilfe der berechneten Daten lassen sich die Anteile der einzelnen Verlustmechanismen in Abhängigkeit von der Magnetfeldfrequenz (mit $B = 1$ T) grafisch darstellen. (s. unten)

Darstellung der Anteile der einzelnen Verlustmechanismen in Abhängigkeit der Feldfrequenz (für die beiden berechneten Beispiele):

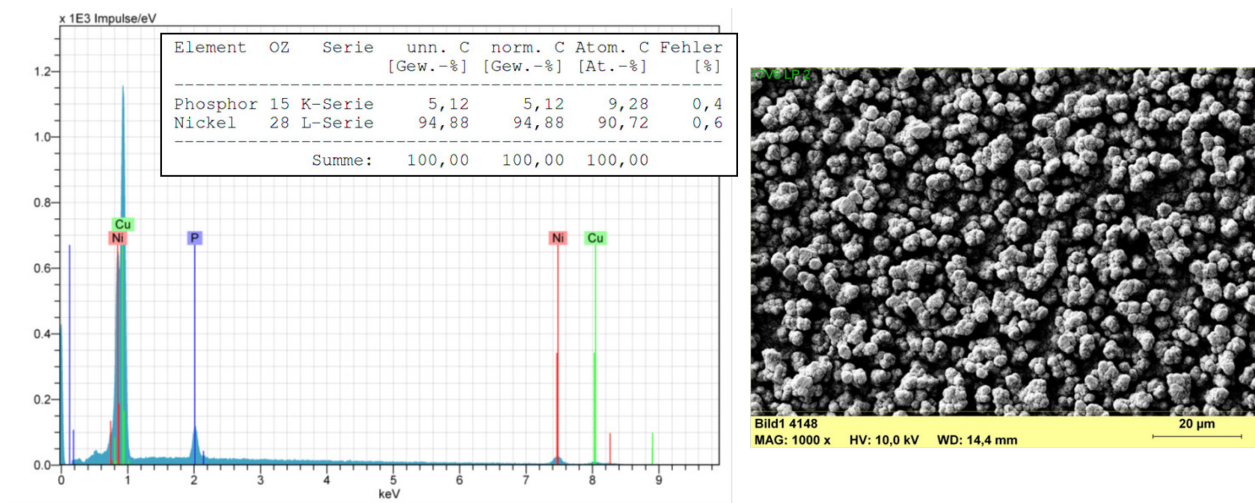


ANHANG C: EDX-MESSUNGEN VON NICKEL-PHOSPHOR-SCHICHTEN

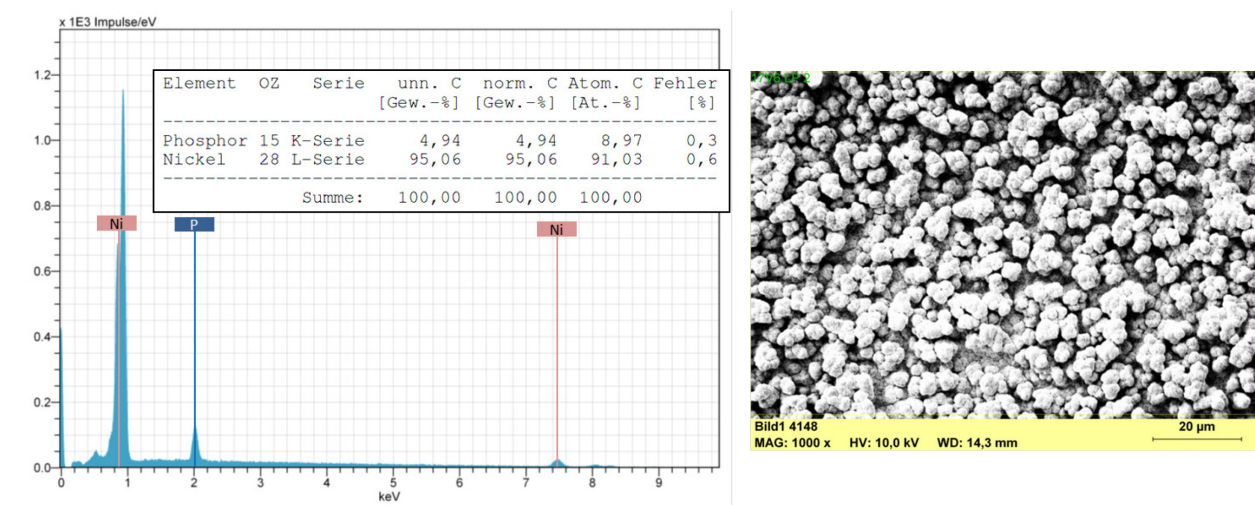
NiP-Folie im Ausgangszustand



NiP-Folie getempert 1h @200 °C

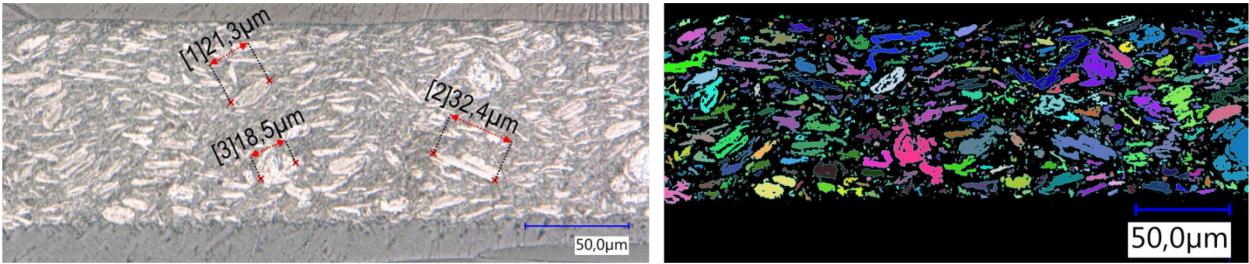


NiP-Folie getempert 1h @300 °C



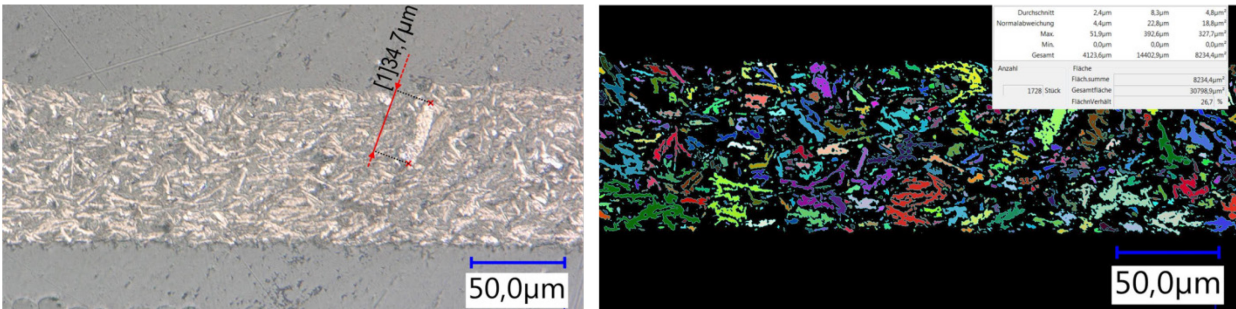
ANHANG D: PARTIKELGRÖßENBESTIMMUNG VON CP-1, CP-2 UND CP-5

CP-1

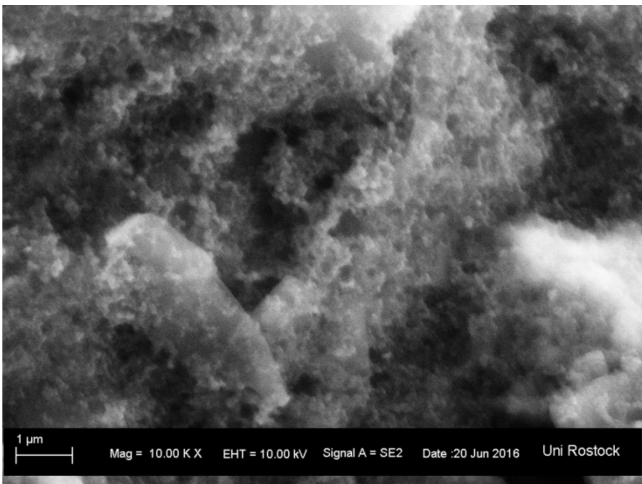


	Maximaldurchmesser / µm	Minimaldurchmesser / µm	Umfang / µm	Fläche / µm²
Durchschnitt	2,3	1	7,5	5,1
Normalabweichung	4,6	2,1	19,5	20,6
Max.	46,6	22,6	245,5	344,3

CP-2

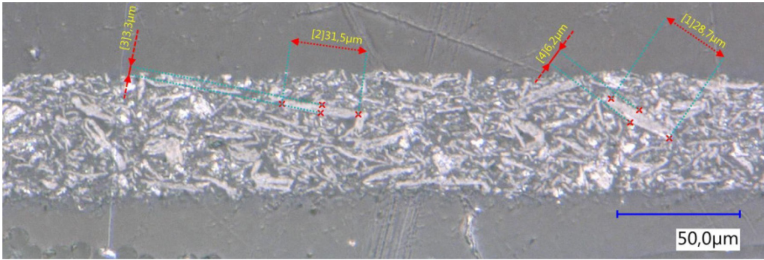


Durchschnitt	2,6µm	8,3µm	4,8µm²
Normalabweichung	4,6µm	22,8µm	18,8µm²
Max.	51,9µm	392,6µm	327,7µm²
Min.	0,0µm	0,0µm	0,0µm²
Gesamt	4121,6µm	14402,9µm	8214,6µm²
Anzahl	1728 Stück		
Fläche			8214,6µm²
Flächsumme			30798,9µm²
Gesamtfläche			38713,5µm²
Flächenverhältnis			28,7 %

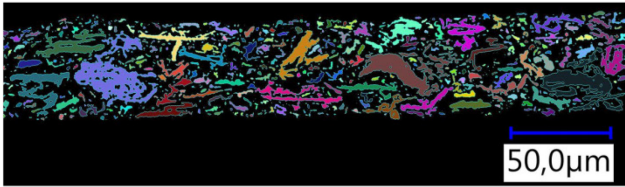
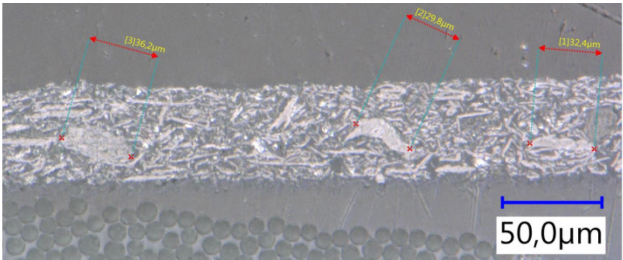


	Maximaldurchmesser / µm	Minimaldurchmesser / µm	Umfang / µm	Fläche / µm²
Durchschnitt	2,4	1,1	8,3	4,8
Normalabweichung	4,4	2,2	22,8	18,8
Max.	51,9	25,5	392,6	327,7

CP-5



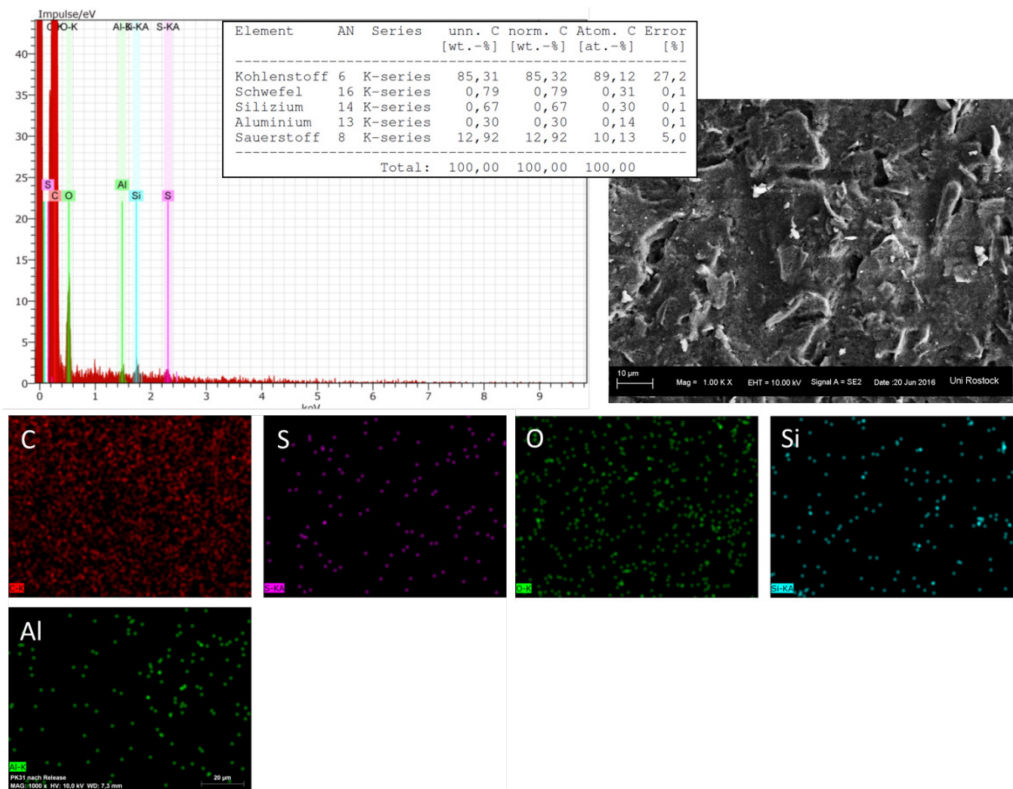
	Maximaldurchmesser / µm	Minimaldurchmesser / µm	Umfang / µm	Fläche / µm²
Durchschnitt	2,8	1,3	10,3	7
Normalabweichung	5,5	2,8	31,5	34,4
Max.	52,8	36,4	418,3	574,2



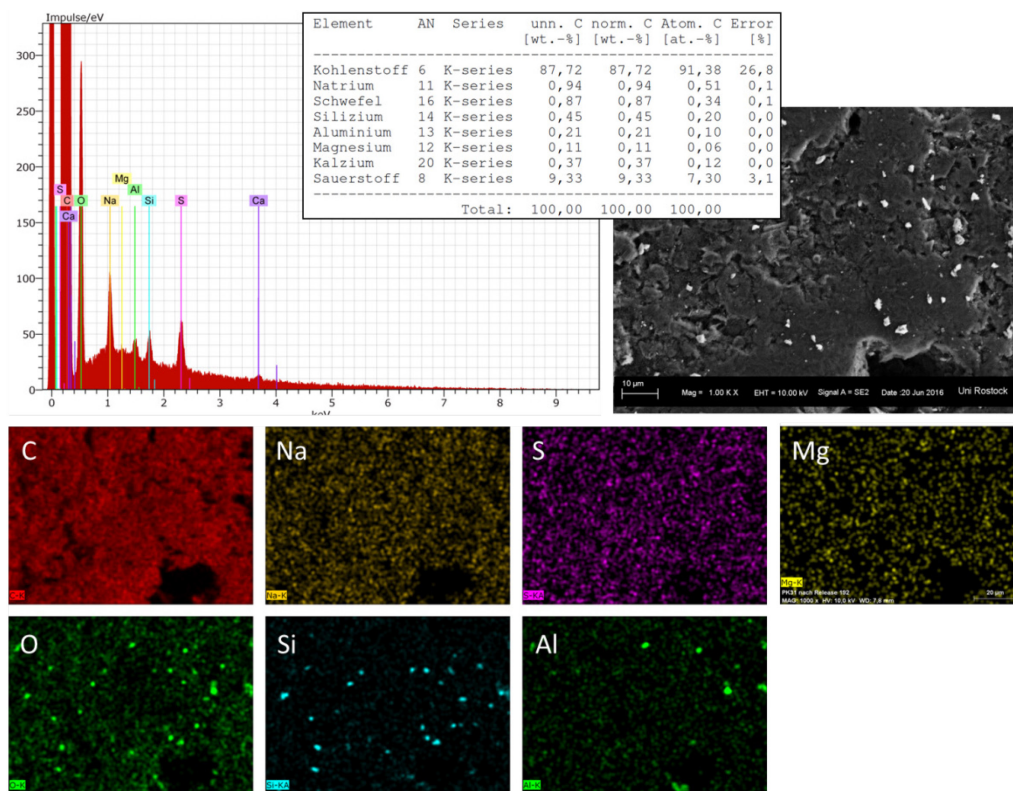
	Maximaldurchmesser / µm	Minimaldurchmesser / µm	Umfang / µm	Fläche / µm²
Durchschnitt	12,9	6,1	49	43,5
Normalabweichung	10,7	4,2	55,7	58,1
Max.	58,5	23,9	296,7	294,6

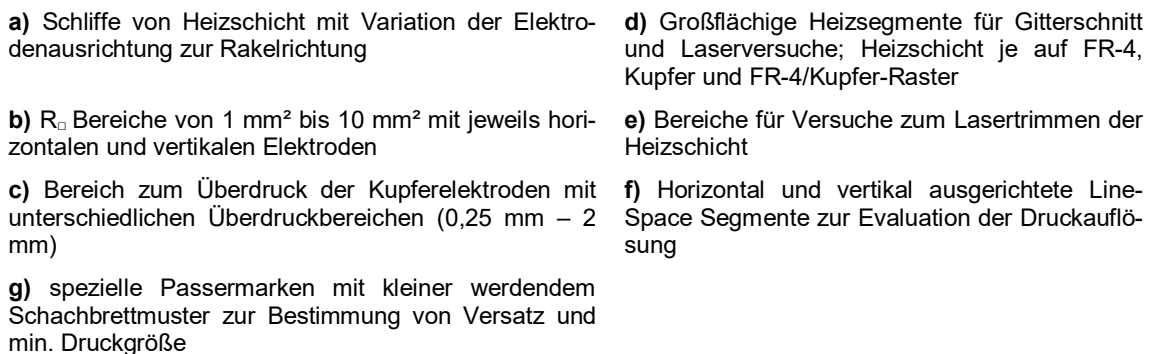
ANHANG E: EDX-MESSUNGEN DER OBERFLÄCHEN VON CP-2 UND CP-3

CP-2:



CP-3:





ANHANG G: MIKROSKOPIE VERMESSUNG DER SIEBE FÜR MANUELLE DRUCKVERSUCHE

Stahlsieb – Mesh 85

Vermessung:

$w = 201 - 228 \mu\text{m}$

$d = 78 - 83 \mu\text{m}$

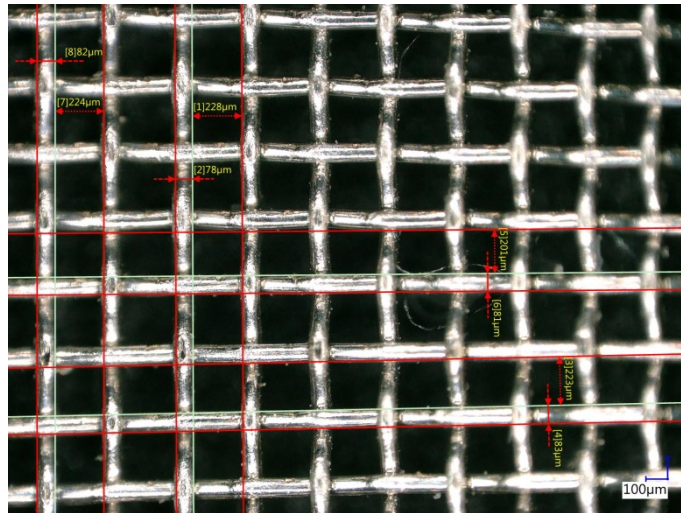
Mesh nach (Gl. 2-9):

Mesh ~ 85

theor. Nassschichtdicke nach (Gl. 2-8):

(mit $D = 2d$)

$\delta_{\text{Schicht}} \approx 84 \mu\text{m}$



Polymersieb – Mesh 137

Vermessung:

$w = 116 - 127 \mu\text{m}$

$d = 60 - 66 \mu\text{m}$

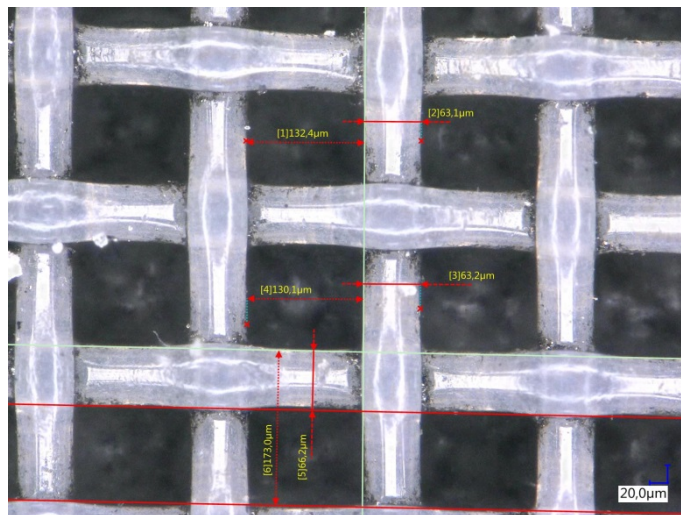
Mesh nach (Gl. 2-9):

Mesh ~ 137

theor. Nassschichtdicke nach (Gl. 2-8):

(mit $D = 2d$)

$\delta_{\text{Schicht}} \approx 54,7 \mu\text{m}$



Stahlsieb – Mesh 200

Vermessung:

$w = 82 - 88 \mu\text{m}$

$d = 39 - 42 \mu\text{m}$

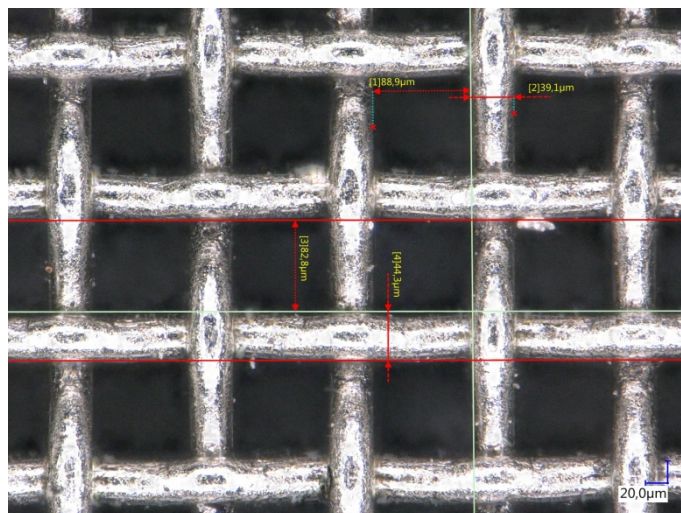
Mesh nach (Gl. 2-9):

Mesh ~ 200

theor. Nassschichtdicke nach (Gl. 2-8):

(mit $D = 2d$)

$\delta_{\text{Schicht}} \approx 37,6 \mu\text{m}$



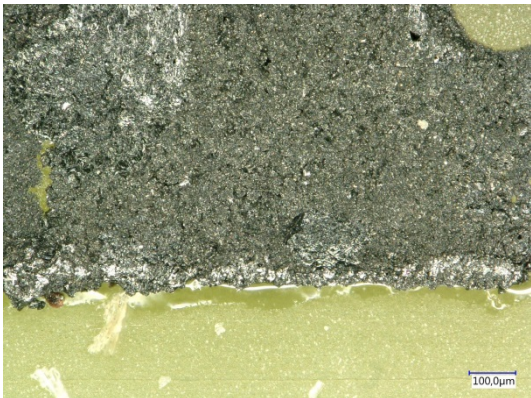
ANHANG H: BEOBACHTETE FEHLERBILDER BEIM MANUELLEN SIEBDRUCK VON CP-3



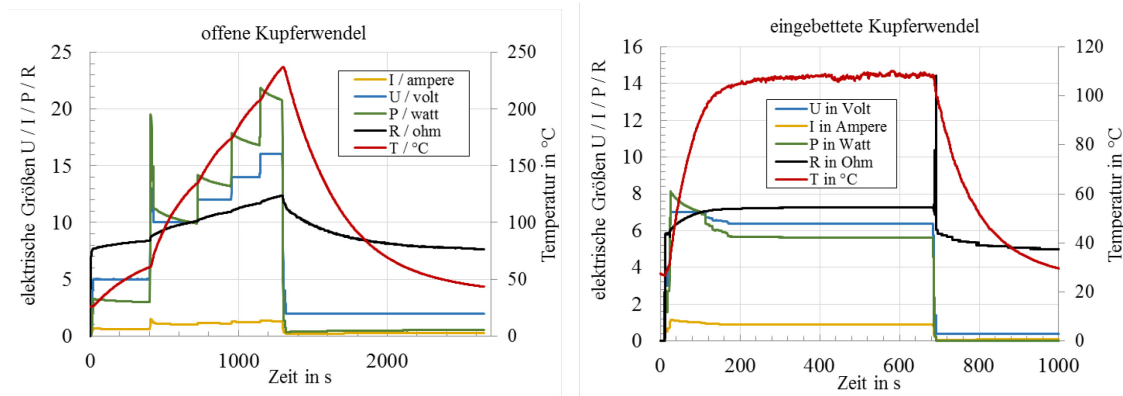
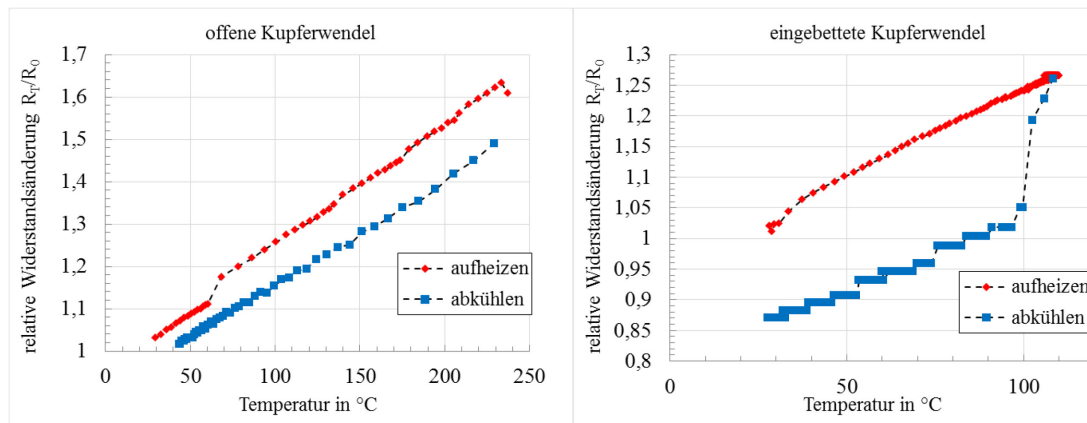
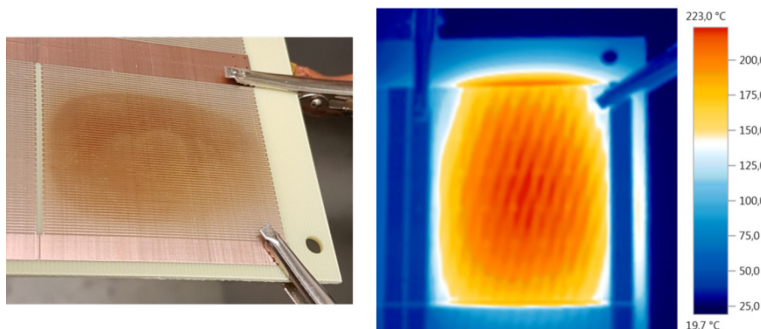
CP-3: Fehlstellen an Randbereichen der gedruckten Schicht



CP-3: Fehlstellen am Übergang zwischen Schicht und Kupferelektrode (vorwiegend an den Rändern)



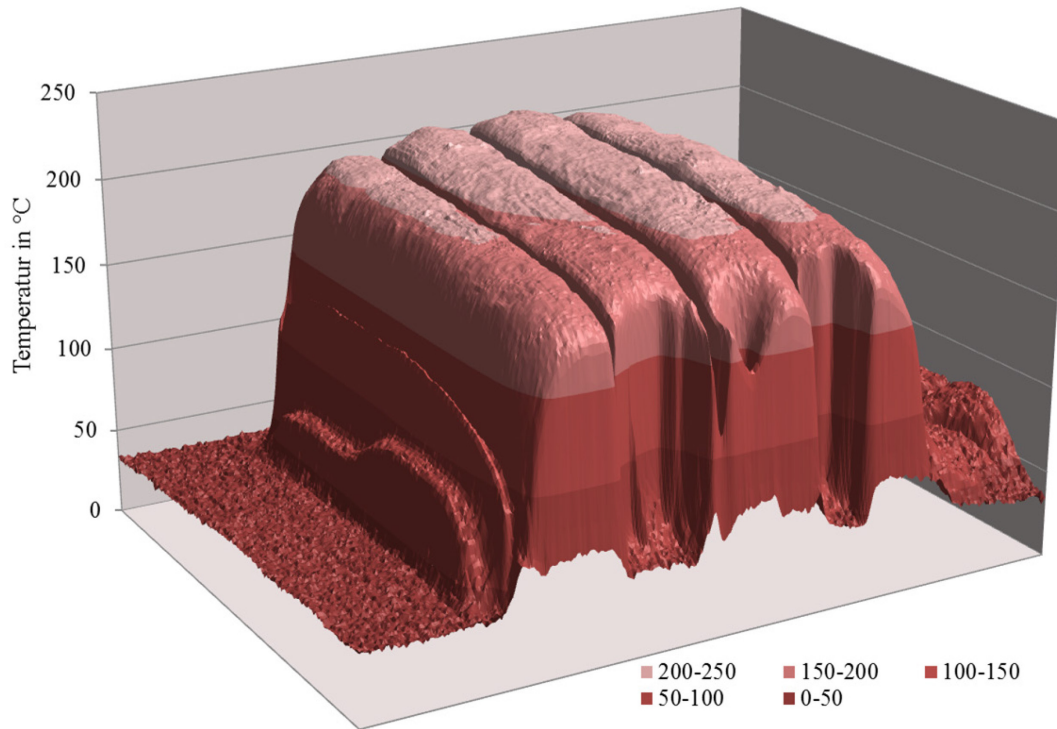
CP-3: Separation von Bindemittel und Füllstoff

ANHANG I: ELEKTRISCHE MESSUNG AN KUPFERWENDEL (OFFEN UND EINGEBETTET)Aufgenommene Parameter:Temperaturverlauf des elektrischen Widerstandes:Oxidation der ungeschützten Kupferschicht und Temperaturverteilung infolge der Erwärmung:

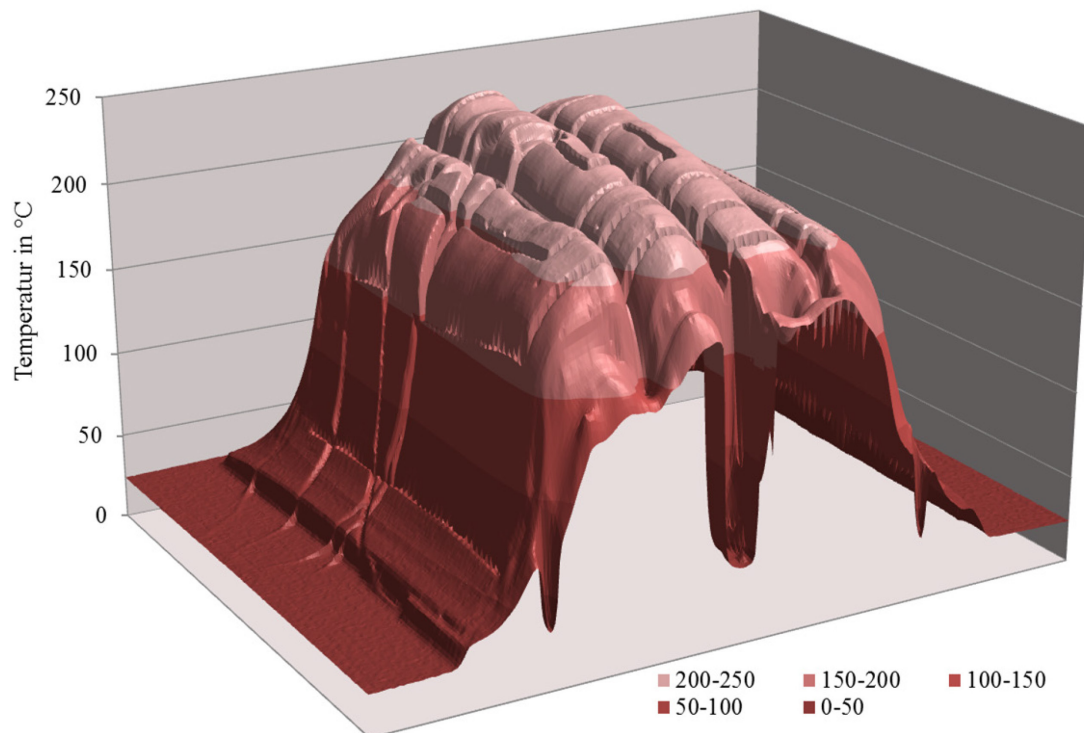
Es ist zu erkennen, dass die Erwärmung nicht homogen über die Fläche der Heizwendel erfolgt. (s. Oxidationsbereich und IR Aufnahme) Dies führt dazu, dass bei lokaler Messung der Temperatur in der Mitte ein globaler Temperaturkoeffizient erfasst wird, welcher weniger ausgeprägt ist als der eigentliche Materialkoeffizient ist.

ANHANG J: X-Y TEMPERATURPROFILE VERSCHIEDENER BEHEIZTER LEITERPLATTENPROBEN

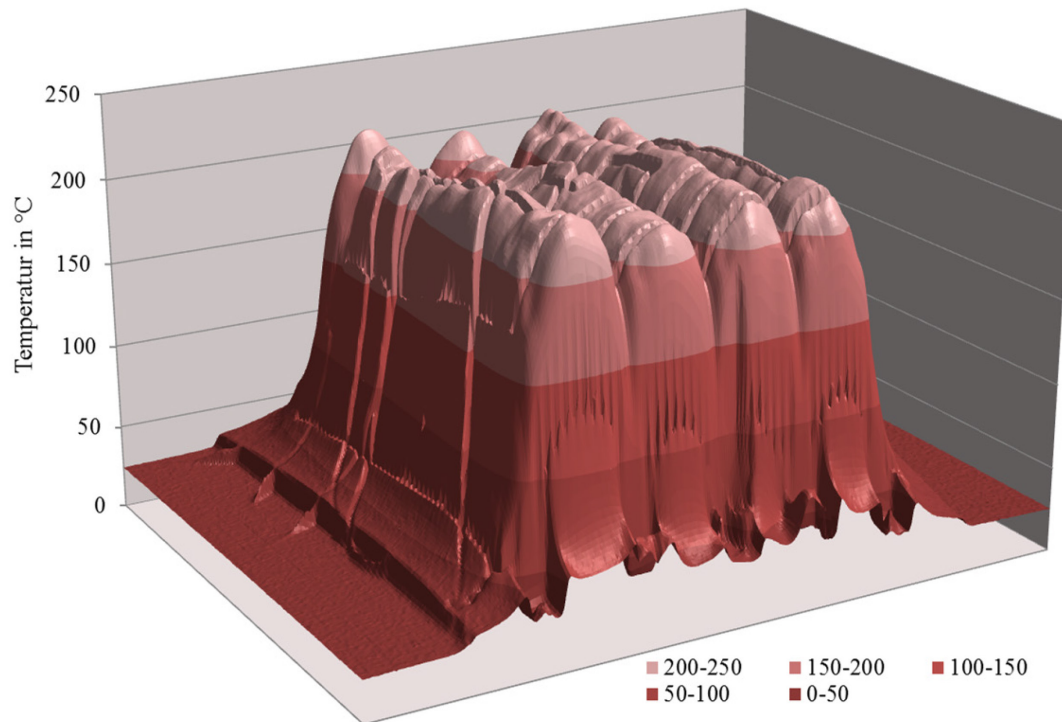
x-y-T-Profil: Probe mit einer freiliegenden NiP-Schicht (zur Abbildung 5-70)



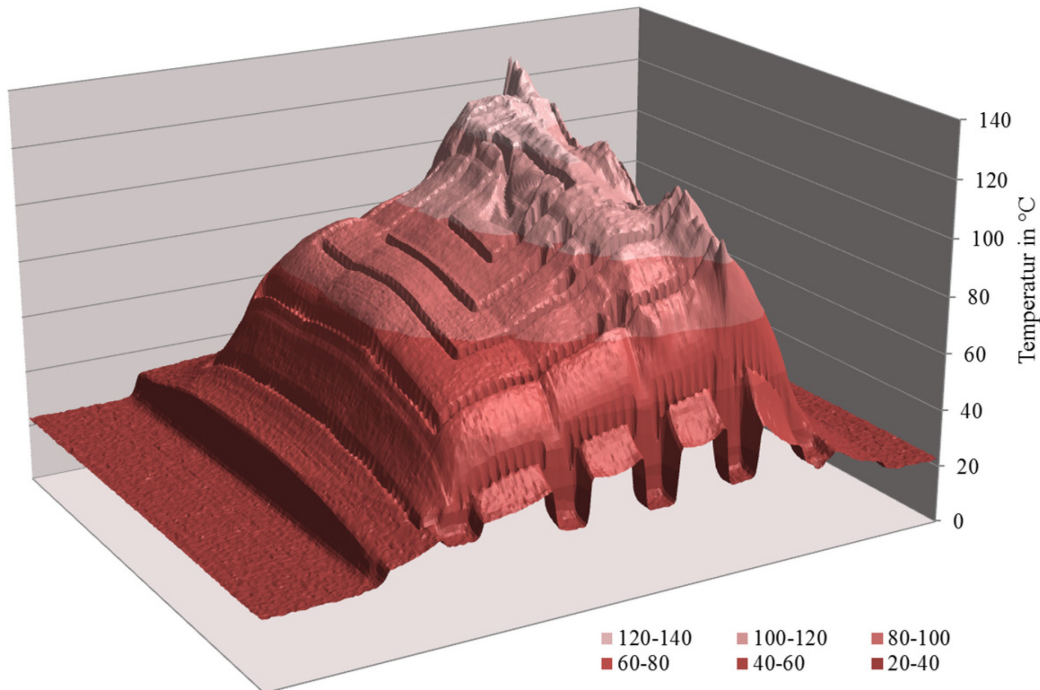
x-y-T-Profil: Probe mit einer eingebetteten NiP-Schicht (zur Abbildung 5-72)



x-y-T-Profil: Probe mit einer eingebetteten CP-2 Schicht (zur Abbildung 5-73)

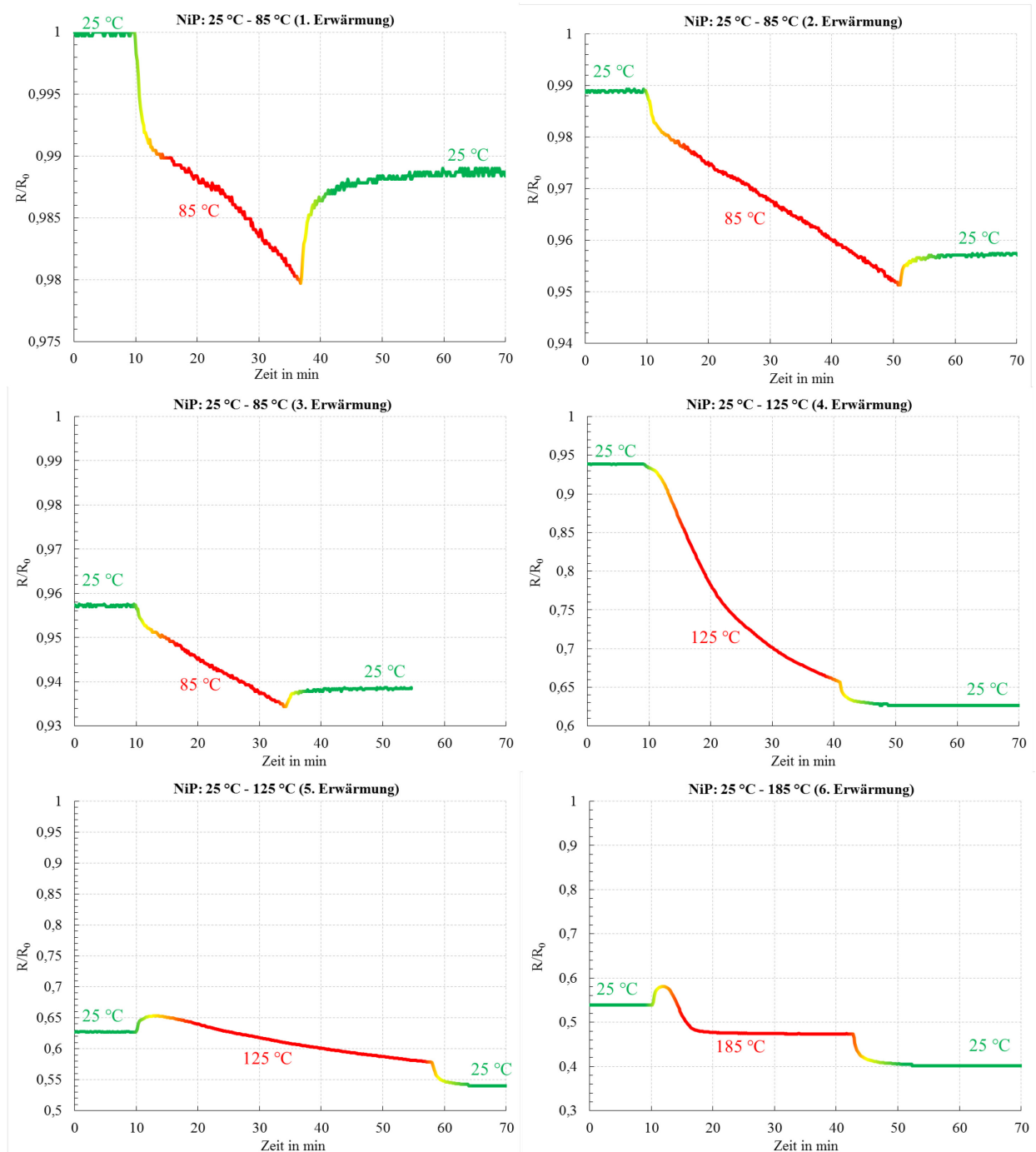


x-y-T-Profil: Probe mit einer eingebetteten CP-3 Schicht (zur Abbildung 5-74)

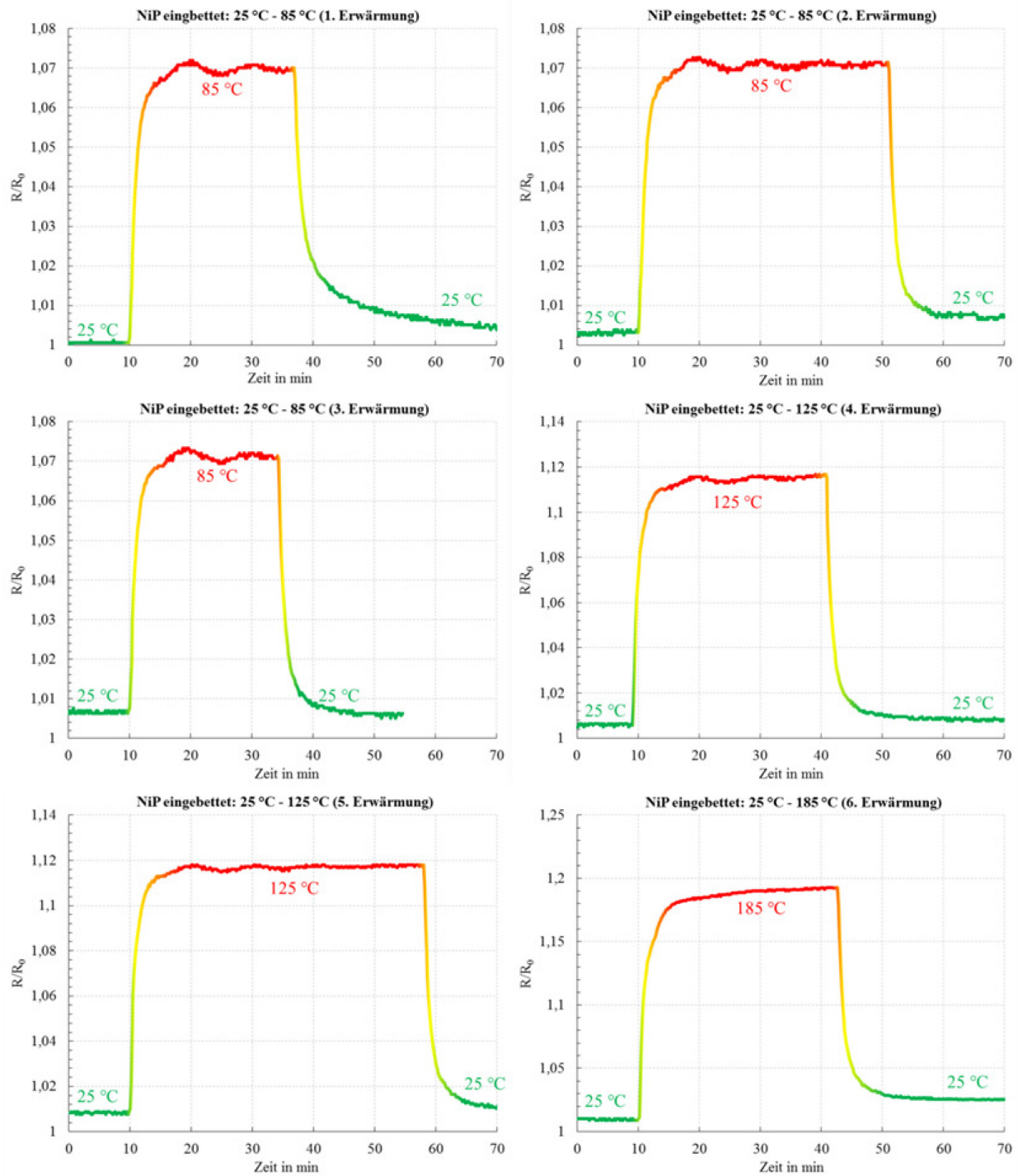


ANHANG K: WIDERSTANDSÄNDERUNG PASSIV GEHEIZTER NICKEL-PHOSPHOR SCHICHTEN FÜR SECHS KONSEKUTIVE HEIZZYKLEN

NiP freiliegend:



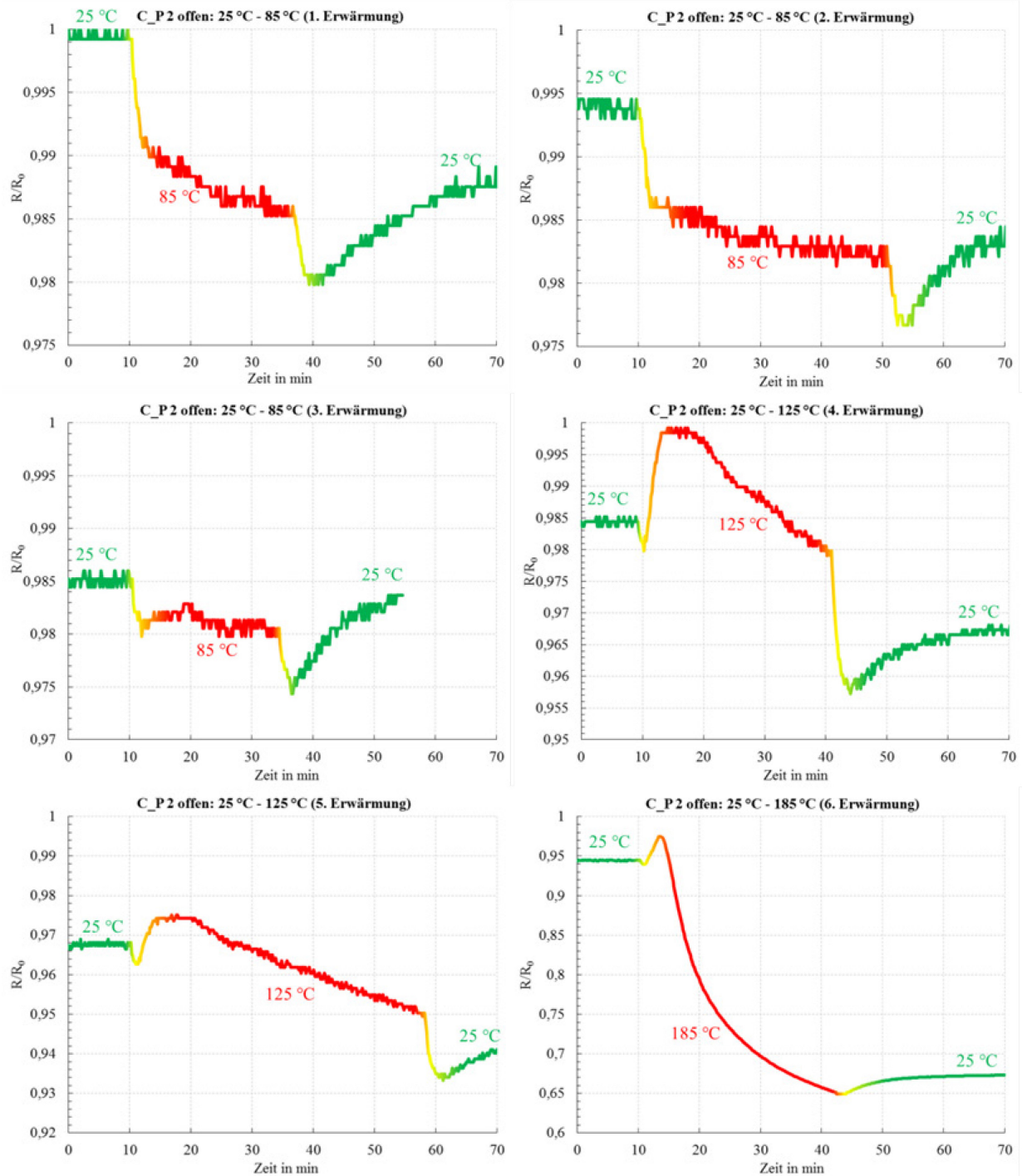
Die einzelnen Schichtwiderstände wurden auf den Ausgangswert der ersten Messung (R_0) bezogen.

NiP eingebettet:

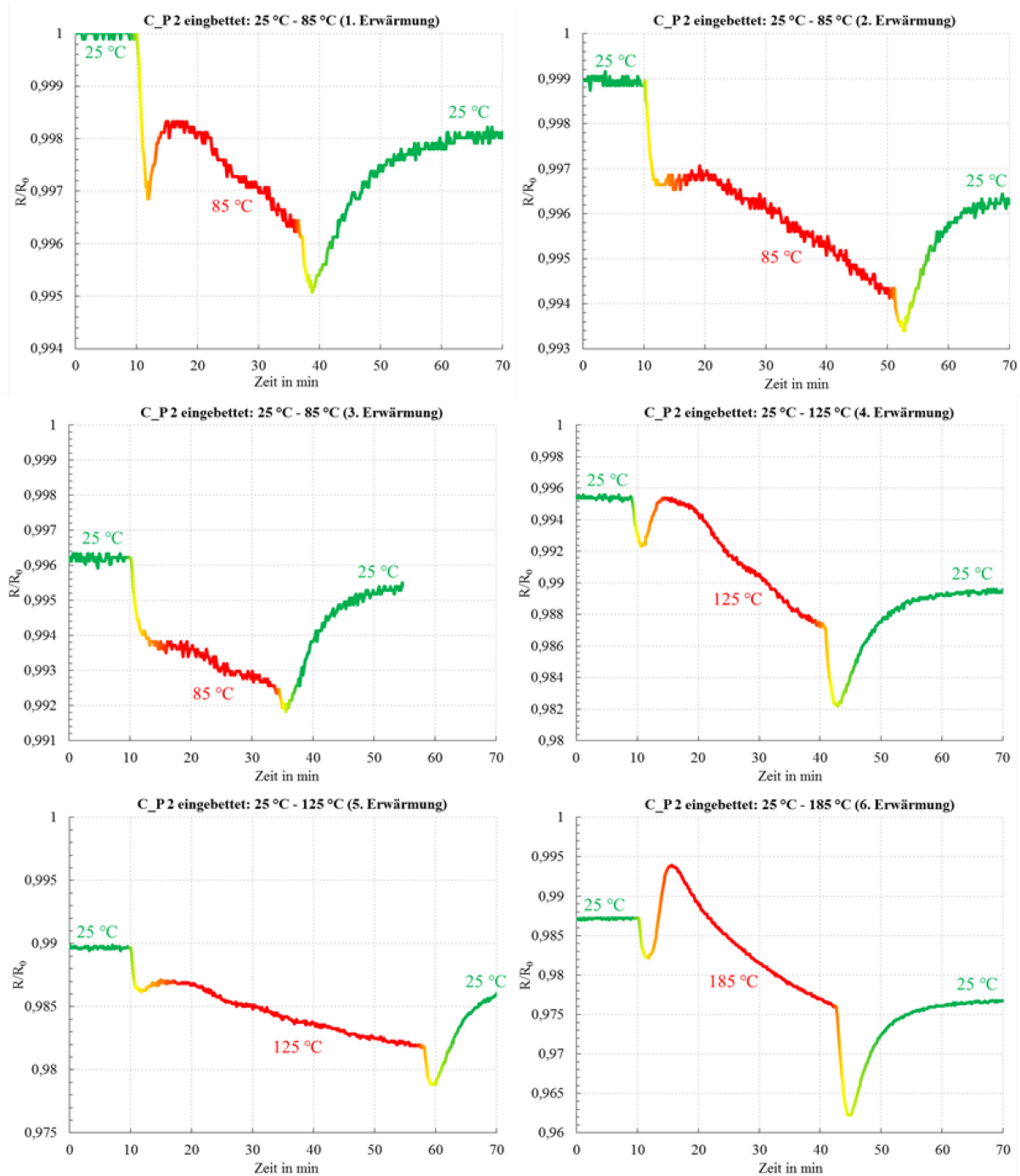
Die einzelnen Schichtwiderstände wurden auf den Ausgangswert der ersten Messung (R_0) bezogen.

ANHANG L: WIDERSTANDSÄNDERUNG PASSIV GEHEIZTER CP-2 SCHICHTEN FÜR SECHS KONSEKUTIVE HEIZZYKLEN

CP-2 freiliegend:



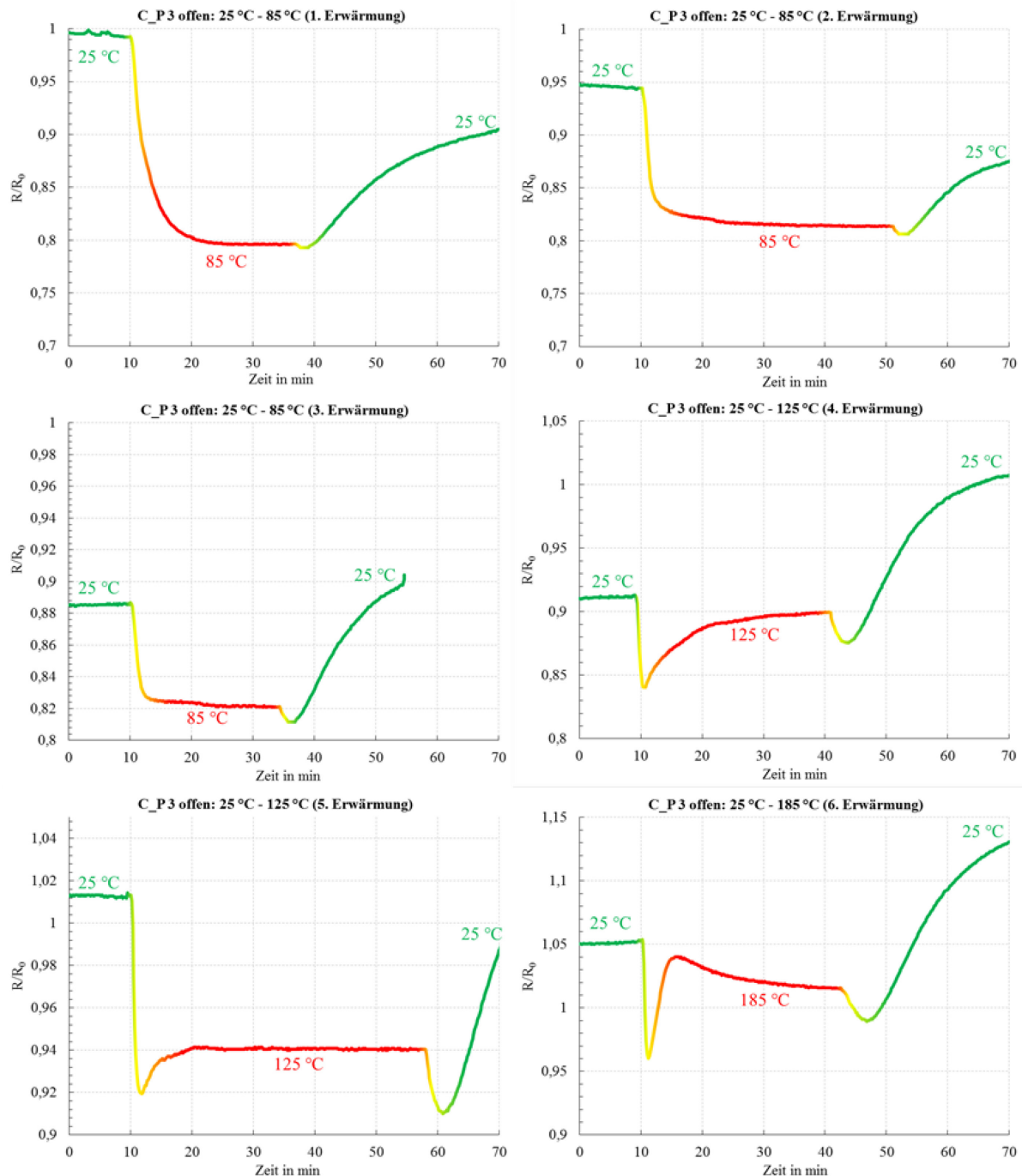
Die einzelnen Schichtwiderstände wurden auf den Ausgangswert der ersten Messung (R_0) bezogen.

CP-2 eingebettet:

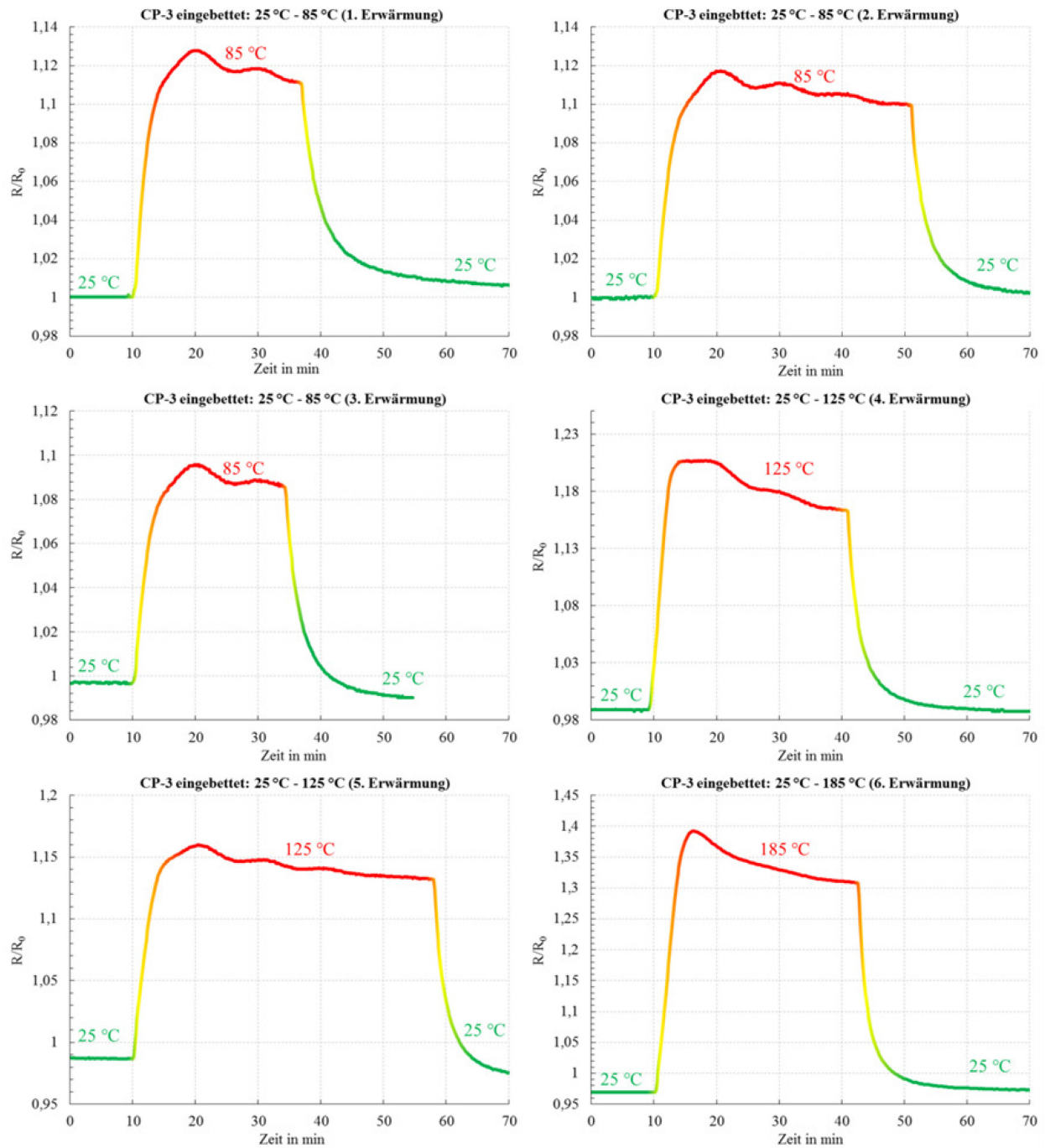
Die einzelnen Schichtwiderstände wurden auf den Ausgangswert der ersten Messung (R_0) bezogen.

ANHANG M: WIDERSTANDSÄNDERUNG PASSIV GEHEIZTER CP-3 SCHICHTEN FÜR SECHS KONSEKUTIVE HEIZZYKLEN

CP-3 freiliegend:



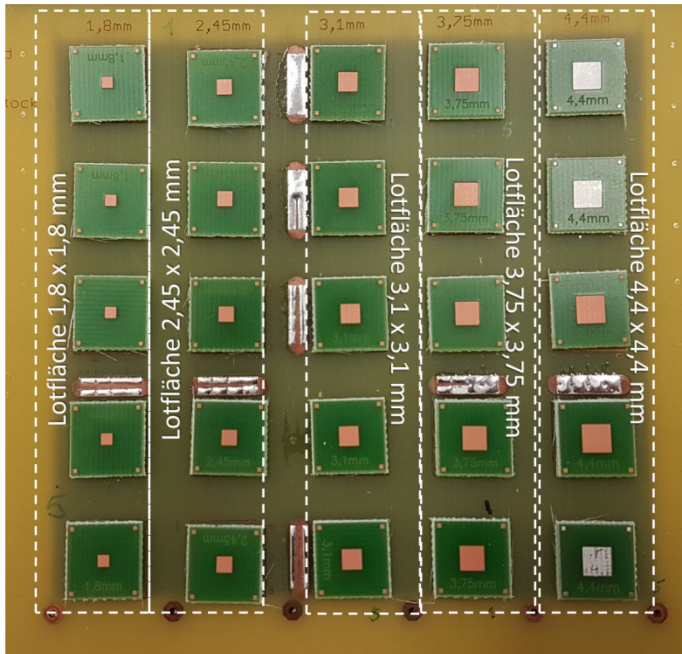
Die einzelnen Schichtwiderstände wurden auf den Ausgangswert der ersten Messung (R_0) bezogen.

CP-3 eingebettet:

Die einzelnen Schichtwiderstände wurden auf den Ausgangswert der ersten Messung (R_0) bezogen.

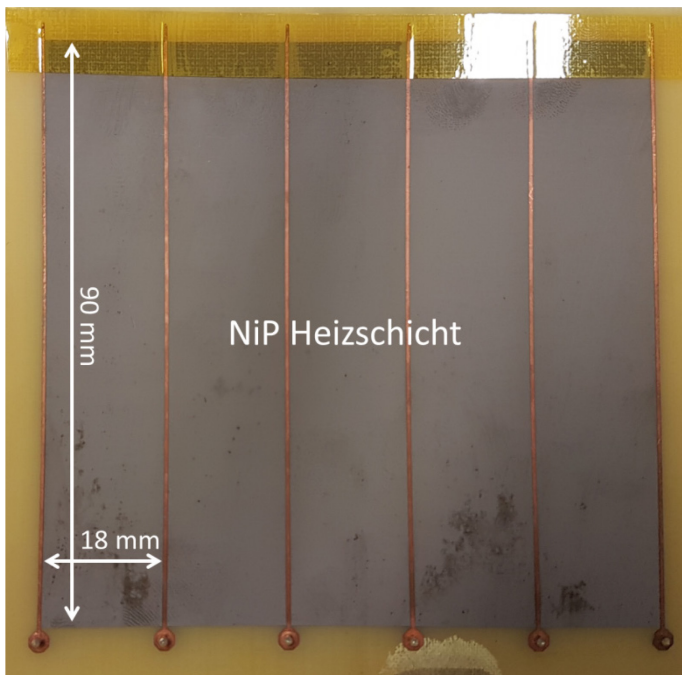
ANHANG N: ZUVERLÄSSIGKEITSDEMONSTRATOREN MIT INTEGRIERTEN HEIZSCHICHTEN

Layout 1 (beheizter Schertest):



Top-Seite

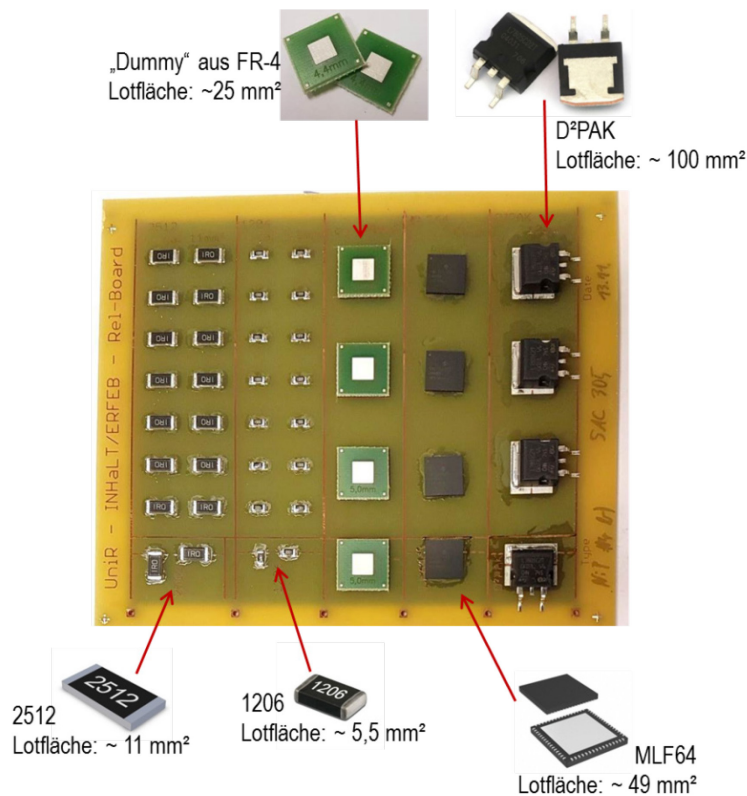
- bestückt mit „Dummy“-Komponenten aus FR-4
- quadratische Lotpads mit unterschiedlichen Größen
- SAC305 Lotpaste (Typ 3)
- Lotpastendruck mit 120 µm Metallschablone



Bottom-Seite

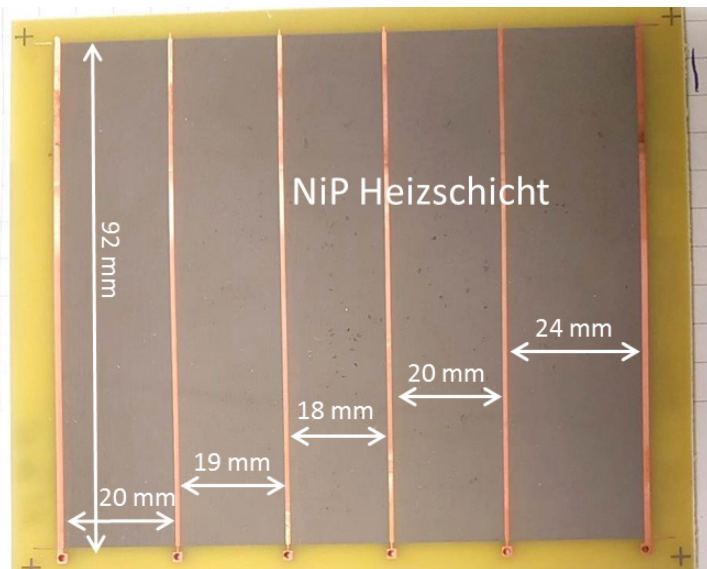
- NiP als Heizschicht (freiliegend)
- Fünf einzeln ansteuerbare Heizsegmente mit gleicher Geometrie

Layout 2 (aktive thermische Alterung, beheizter Schertest):



Top-Seite

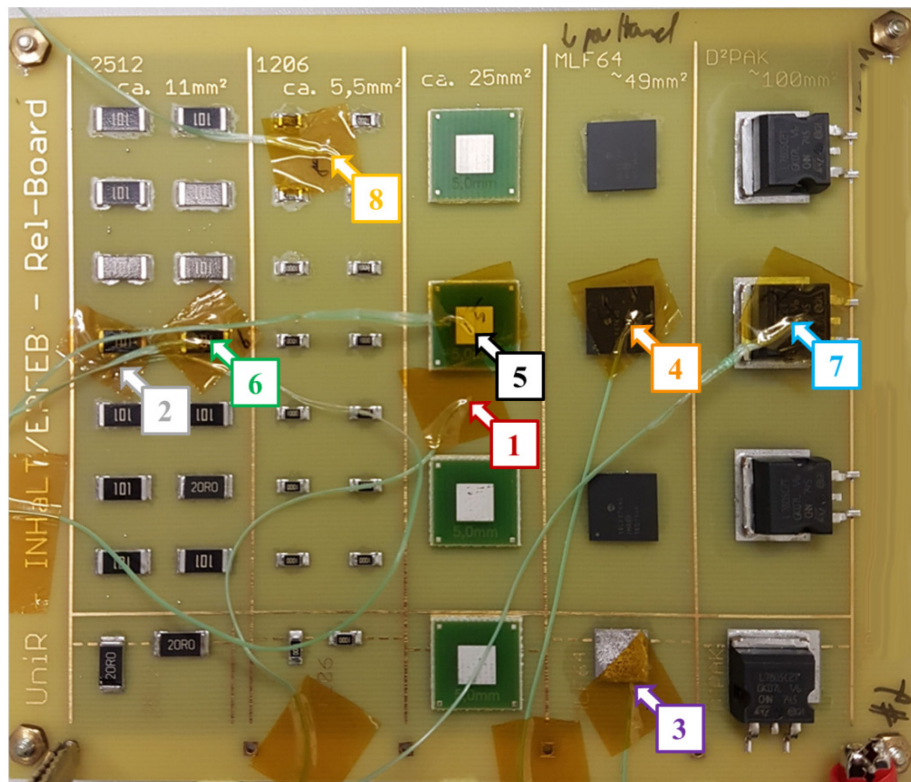
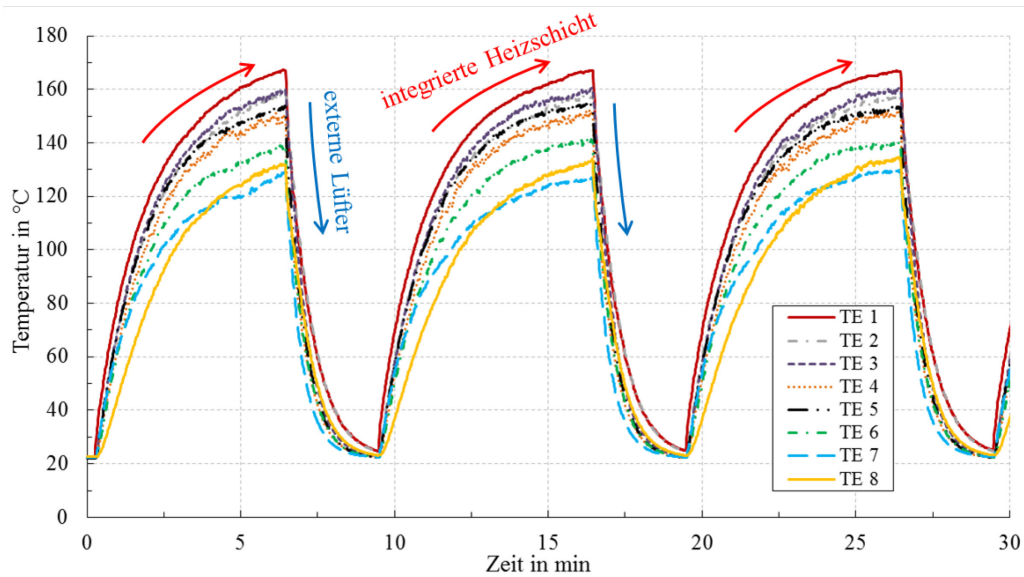
- bestückt mit unterschiedlichen Bauelementen bzw. Dummy's
- SAC305 Lotpaste (Typ 3)
- Lotpastendruck mit 120 µm Metallschablone



Bottom-Seite

- NiP als Heizschicht (freiliegend)
- Fünf einzeln ansteuerbare Heizsegmente
- Breite der Heizsegmente an Platzbedarf der bestückten Komponenten angepasst

ANHANG O: THERMOELEMENTPOSITIONIERUNG UND ZYKLEN BEIM VERSUCH ZUR AKTIVEN THERMISCHEN ALTERUNG



TE 1 – Zentrum der Platine

TE 2 – linker Rand (5 mm bis HS-Ende)

TE 3 – unterer Rand (5 mm bis HS-Ende)

TE 4 – Oberhalb MLF64

TE 5 – Oberhalb Dummy (d=1,5 mm)

TE 6 – Oberhalb 2512

TE 7 – Oberhalb D²PAK

TE 8 – oberer Rand (10 mm bis HS-Ende)

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] J. Wiesböck und M. Gasch, „100 Jahre Leiterplatte - Die Geschichte vom Rückgrat der Elektronik,“ *Elektronik Praxis*, Nr. 15, pp. 182 - 185, 2016.
- [2] G. E. Moore, „Cramming more components onto integrated circuits,“ *Electronics, volume 38, number 8*, pp. 114 - 117, 1965.
- [3] C. Mallok und H. Reichl, „Die multifunktionale Leiterplatte - Leiterplatten mit integrierten aktiven und passiven Komponenten - Potenzial und Anforderungen,“ *Elektronik Praxis*, 19. Mai 2008.
- [4] A. Ostmann, „Miniature camera may lead to fewer accidents,“ Fraunhofer IZM, www.fraunhofer.de, 2014.
- [5] J. Kostelnik, *Präsentation: Multi-Funktionale Boards - MFB - mit embedded Components*, 18. EE Kolleg - Sant Jordi: Würth Elektronik, 2015.
- [6] E. Waffenschmidt und J. A. Ferreira, „Embedded passives integrated circuits for power converters,“ in *Proceedings of 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Cairns, 2002.
- [7] F. Dietrich, „Multifunktionale Leiterplatte,“ in *GMM-Fachbericht 55: EBL 2008*, Fellbach, 2008.
- [8] J. S. de Sousa, P. Fulmek, M. Unger, P. Haumer und J. Nicolics, „Enhanced Heat Transport in Printed Circuit Boards via Passive Components Embedding,“ in *Proceedings of 2017 IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)*, Gothenburg, 2017.
- [9] F. Ebling, J. Kostelnik und R. Schönholz, „Verfahren zur Einbettung aktiver Komponenten in Leiterplatten – Stand der Technik, Zuverlässigkeit und Entwicklungstendenzen,“ in *DVS-Berichte 265 EBL 2010*, Fellbach, 2010.
- [10] D. Manassis, J. Pawlikowski, K. Schischke, A. Ostmann, R. Aschenbrenner und M. Schneider-Ramelow, „Embedding technologies for heterogeneous integration of components in PCBs-an innovative modularisation approach with environmental impact,“ in *Proceedings of European Microelectronics Packaging Conference EMPC 2017*, Warsaw, 2017.
- [11] A. Stogel, T. Zeh, F. Goldschmidtboing, P. Woias und T. Huesgen, „Integration von Piezoelektrika in Multilayer-Leiterplatten –eine Machbarkeitsstudie-,“ in *Tagungsband MikroSystemTechnik Kongress 2017*, München, 2017.
- [12] E. Sergeeva, Optofluidic Microsystems on Printed Circuit Boards - Polymer-

- Based integrated optical Waveguides and Microfluidic Structures for Sensing of Fluids, Dissertation, Rostock: Universität Rostock, 2018.
- [13] S. Gaßmann, Mikrosystem zur Fließ-Injektions-Analyse in Leiterplattentechnologie, Dissertation, Rostock: Universität Rostock, 2008.
- [14] T. Merkel, M. Graeber und L. Pagel, „A new technology for fluidic microsystems based on PCB technology,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, Bd. 77, Nr. 2, pp. 98-105, 1999.
- [15] T. Blank, Dissertation: Funktionale Schichten in Leiterplatten Entwicklung von intelligenten Mikrovibrationssensoren in mehrdimensionaler Leiterplattentechnologie, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013.
- [16] W. Krause, Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik, Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig, 2000.
- [17] IPC-SM-785, *Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments*, Northbrook: www.ipc.org, 1992.
- [18] IPC-9701A, *Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments*, Bannockburn: www.ipc.org, 2006.
- [19] F. Bremerkamp, Integration eines Sorptionsspeichers in das Wärmemanagement von elektronischen Baugruppen; Dissertation, Templin: Detert, 2014.
- [20] J. Maxa, A. Novikov, M. Nowotnick, M. Heimann und K. Jarchoff, „PCM-based Thermal Buffer Coating for High Temperature Applications,“ in *Proceedings of 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, Dresden, 2018.
- [21] W. W. Wits, Dissertation: Integrated Cooling Concepts for Printed Circuit Boards, Amsterdam: University of Twente, 2008.
- [22] J. S. de Sousa, P. Fulmek, M. Unger, P. Haumer und J. Nicolics, „Embedded heat pipes as thermal solution for PCBs,“ in *Proceedings of 2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, Yamagata, 2017.
- [23] V. L. Lanin und A. I. Lappo, „Efficiency Estimation of Infrared Heating Systems for Mounting Electronic Modules,“ *Electronics Science Technology and Application*, Bd. 5, Nr. 1, pp. 1-5, 2018.
- [24] B. Müller, M. Hanisch, D. Seehase, D. Wormuth und M. Nowotnick, ThermoFlux - Energieeffiziente Lötprozesse durch autonom schmelzende Lotpasten,

- Bd. 21, M. Nowotnick, J. Wilde und U. Pape, Hrsg., Templin: Verlag Markus Detert, 2015.
- [25] D. Seehase, F. Bremerkamp, H. Huth und M. Nowotnick, „Bewertung der Qualität und Zuverlässigkeit von mit exotherm reagierenden Pasten hergestellten Lötverbindungen,“ in *DVS-Berichte 301 EBL 2014*, Fellbach, 2014.
- [26] VDI/VDE, *VDI/VDE Richtlinie 3710 - 3 Begriffsbestimmungen*, Gesellschaft Mikro- und Feinwerktechnik, 1993.
- [27] C. Brunetti, D. S. Hoynes und W. J. Cronin, „New Advances in Printed Circuits,“ in *Proceedings of the First technical Symposium on Printed Circuits*, Washington D.C., 1948.
- [28] W.-D. Schmidt, *Grundlagen der Leiterplatten-Baugruppen-Entwicklung und Fertigung*, München: GRIN-Verlag, 2012.
- [29] Deutsche Industrie Norm, *DIN 40804 - Gedruckte Schaltungen; Begriffe*, Beuth Verlag, 1977.
- [30] A. Mizrachi, „Substrate Materials, Vortrag,“ orbotech, www.iltam.org, 2018.
- [31] A. Schreivogel und J. Kostelnik, „More than flexible – Polyurethan als neue Lösung für flexible und dehbare Elektronik,“ in *DVS-Berichte 340 EBL 2018*, Fellbach, 2018.
- [32] NCAB Group, *Seminar no.7 / Insulated Metal Substrate, Presentation*, www.ncabgroup.com, 2015.
- [33] LEITON, „Basismaterialien Datenbank für Leiterplatten,“ LeitOn GmbH, 2018. [Online]. Available: www.leiton.de/leiterplatten-basismaterialien-datenbank.html. [Zugriff am 20. Dezember 2018].
- [34] M. Hummel, *Einführung in die Leiterplatten- und Baugruppenttechnologie*, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2017.
- [35] W. Scheel, *Baugruppenttechnologie der Elektronik - Montage*, Berlin: Verlag Technik, 1999.
- [36] H. Hofmann und J. Spindler, *Werkstoffe in der Elektrotechnik - Grundlagen-Struktur-Eigenschaften-Prüfung-Anwendung-Technologie*, München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [37] AGC Nelco, *Datenblatt: N5000 BT Epoxy Laminate and Prepreg*, Anaheim, CA: www.AGC-Nelco.com, 2013.
- [38] Hertrampf GmbH, *Datenblatt: Kunststoffe EN 60893/DIN 7735*, Langerwehe:

- www.hertrampf-gmbh.de, 2011.
- [39] E. Christner, „Leiterplatten-Basismaterialien für erhöhte Anforderungen, Vortrag,“ Isola, Endingen, 2011.
 - [40] M. Cygon, „Wärmemanagement bei Leiterplatten - Innovationen und Denkanstöße,“ in *SMT Hybrid Packaging*, Stuttgart, 2012.
 - [41] R. Ratchev, C. Mager, M. Guyenot, A. Khoshamouz, T. Gottwald und S. Kreuer, „Hochtemperatur-Leiterplattenmaterialien für die Leistungselektronik unter erhöhter Belastung,“ in *DVS-Berichte 340 EBL 2018*, Fellbach, 2018.
 - [42] ILFA, „Hybride Leiterplatten Eine Alternative, die sich lohnt!“, ILFA Feinstleiter Technologie, www.ilfa.de, 2016.
 - [43] R. Schramm, A. Reinhardt und J. Franke, „Capability of Biopolymers in Electronics Manufacturing,“ in *Proceedings of 35th Spring Seminar on Electronics Technology*, Bad Aussee, 2012.
 - [44] IPC/JPCA-4104, *Specification for High Density Interconnect (HDI) and Microvia Materials*, Bannockburn: ANSI, 1999.
 - [45] Nitto Boseki, *Nittobo New Glass fabric for PCB*, [https://www-03.ibm.com/procurement/proweb.nsf/objectdocswebview/file2011+ibm+pcb+symposium+nittobo/\\$file/ibm+pcb+symposium+nittobo.pdf](https://www-03.ibm.com/procurement/proweb.nsf/objectdocswebview/file2011+ibm+pcb+symposium+nittobo/$file/ibm+pcb+symposium+nittobo.pdf): Nitto Boseki Co., Ltd., 2011.
 - [46] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure - Von der Synthese bis zur Anwendung*, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
 - [47] M. Suppa, *Schutzlacke für elektronische Baugruppen*, W. Peters, Hrsg., Kempen: Stünings Medien GmbH, 2010.
 - [48] M. Wacker, P. Trawiel und G. W. Ehrenstein, „Sonderdrucke - Härtung von Reaktionsharzen Time-Temperature-Transition-Diagramm,“ LKT, FAU Erlangen-Nürnberg, 2010.
 - [49] Isola, *Datenblatt: IS410 Lead-free Epoxy Laminate and Prepreg*, Chandler, AZ: www.isola-group.com, 2015.
 - [50] K. Ritz, *Spezielle Multilayer*, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2013.
 - [51] Isola, *185HR - Verarbeitungshinweise*, Düren: www.isola-group.com, 2013.
 - [52] W. Jillek und G. Keller, *Handbuch der Leiterplattentechnik (Band 4)*, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2003.
 - [53] Arlon, „LOW-FLOW GUIDE v.1.8,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.arlonemd.com/wp-content/uploads/2016/05/Low-Flow-Guide->

- v1.8-2016.pdf. [Zugriff am 06. März 2019].
- [54] Heraeus Electronics, „Bonding Wires for Semiconductor Technology,“ Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, Hanau, 2017.
 - [55] R. Fiehler, S. Schädlich, L. Lange und D. Werner, „Aluminium vs. Kupfer – Chancen und Herausforderung zum Einsatz von Aluminium für eine neue Leiterplattentechnologie,“ in *DVS-Berichte 301: EBL 2014*, Fellbach, 2014.
 - [56] S. Hertel, D. Wünsch, M. Wiemer, T. Otto und S. Friedrich, „Elektrochemische Abscheidung von Aluminium für die Leiterplatte,“ in *DVS-Berichte 340 EBL 2018*, Fellbach, 2018.
 - [57] E. Ivers-Tiffée und W. von Münch, *Werkstoffe der Elektrotechnik*, Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007.
 - [58] S. Globisch, *Lehrbuch Mikrotechnologie für Ausbildung, Studium und Weiterbildung*, München: Carl-Hanser-Verlag, 2011.
 - [59] K. Nitzsche und H.-J. Ullrich, *Funktionswerkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik*, Stuttgart: Hüthig Verlag, 1998.
 - [60] K. Lunze, *Einführung in die Elektrotechnik*, Berlin: Verlag Technik, 1991.
 - [61] R. Franz und G. H. Wiedemann, „Ueber die Wärme-Leitungsfähigkeit der Metalle,“ *Ann. Phys. Chem. (Annalen der Physik und Chemie)*, Bd. 165, Nr. 8, pp. 497-531, 1853.
 - [62] L. Lorenz, „Bestimmung der Wärmegrade in absolutem Maasse,“ *Ann. Phys. Chem. (Annalen der Physik und Chemie)*, Bd. 223, Nr. 11, pp. 429-452, 1872.
 - [63] H. Christian, *Systematische Untersuchungen zur Lorenz-Zahl bei hochlegierten Stählen*, Dissertation, Graz: Technische Universität Graz, 2011.
 - [64] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, Berlin: Springer Verlag, 2015.
 - [65] M. Reisch, *Elektronische Bauelemente*, Berlin: Springer Verlag, 2007.
 - [66] W. Böge und W. Pläßmann, *Vieweg Handbuch Elektrotechnik*, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1999.
 - [67] O. Zinke und H. Seither, *Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe*, Berlin: Springer Verlag, 2013.
 - [68] C. Bing, W. Keru und Y. Wu, „Characteristics of Resistivity-temperature for Carbon Fiber Reinforced Concrete,“ *Journal of Wuhan University of Technolog - Malterial Science Edition*, Bd. 21, Nr. 1, pp. 121-124, 2006.
 - [69] TDK, *NTC Thermistors - General technical information*, www.tdk.com

- electronics.tdk.com, 2018.
- [70] ROGERS Corporation, *Copper Foils for High Frequency Materials - Properties*, Chandler: www.rogerscorp.com, 2018.
- [71] A. Novikov, Herstellung und Charakterisierung von nanoskaligen Lotschichten; Dissertation, Templin: Detert, 2012.
- [72] M. Oezkoek, H. Mertens und M. Bruder, „Immersion Tin Surface Finish - Reviewing the Past and a Look to the Future,“ *Proceedings of SMTA International 2014*, pp. 941 - 944, 2014.
- [73] Contag AG, *Oberflächenübersicht*, Berlin: <http://www.contag.de>, 2016.
- [74] R. Taube und A. Wiemers, Leiterplatten- und Baugruppenteknik - Oberflächen von Leiterplatten, Berlin: LeiterplattenAkademie, 2013.
- [75] J. Nable, *PCB Surface Finishes: A General Review*, <https://smtnet.com>, 2015.
- [76] C. F. Coombs, Printed circuits handbook (6th edition), New York: McGraw-Hill, 2008.
- [77] G. Herrmann, Handbuch der Leiterplattentechnik - Band 3 Leiterplattentechnik, Herstellung und Verarbeitung, Produkthaftung, Umweltschutztechnik mit Entsorgung, Saulgau: Leuze Verlag, 1993.
- [78] M. Huschka, Einführung in die Multilayer-Presstechnik, Saulgau: Leuze Verlag, 1988.
- [79] ACD Technologies SpA - Cedat Division, *ADARA Press mod. 73HsD, Datenblatt*, Gazzada Schianno (VA): <https://www.pcbequipment.com/images/machines/website/19270/Adara73HsD.pdf>, 2002.
- [80] O. Johann, „Neue Perspektiven in der Leiterplattentechnik durch den Einsatz von Embedded-Passives,“ in *GMM-Fachbericht 55: EBL 2008*, Fellbach, 2008.
- [81] J. Wolf, *Embedded Component Technology – ECT, Vortrag*, Rot am See: www.we-online.de, 2015.
- [82] A. Mizrachi, *Embedded Passive Components - Trend & Applications, Vortrag*, orbotech, 2018.
- [83] B. P. Mahler, „Improved Thin-Film Resistor Material,“ *The PCB Design Magazine*, pp. 24-28, September 2013.
- [84] SAMINA-SCI, „PCB Fabrication - Buried Capacitance Technology,“ 2006. [Online]. Available: http://www.sanmina.com/wp-content/uploads/2016/05/buried_capacitance_technical_0106.pdf. [Zugriff

- am 19. 11. 2018].
- [85] N. Smith, J. Fan, J. Andresakis, Y. Fukawa, M. Harvey und J. Knighten, „Embedded Capacitor Technology: A Real World Example,“ in *32nd IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, San Jose, CA, 2007.
 - [86] A. Risse, *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
 - [87] Deutsche Industrie Norm, *DIN 8505-1 Löten; Allgemeines, Begriffe*, Beuth Verlag, 1979.
 - [88] K. Wittke und W. Scheel, *Handbuch Lötverbindungen*, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2011.
 - [89] S. Wiebel, *Untersuchung zur thermischen Langzeitstabilität von Epoxidharzen der elektrischen Isoliertechnik in Abhängigkeit von oxidativen Umgebungseinflüssen*, Dissertation, Darmstadt: TU Darmstadt, 2012.
 - [90] P. Lambracht, *Materialwissenschaftliche Aspekte bei der*, TU Darmstadt: Dissertation, 2002.
 - [91] ASM International, *Alloy phase diagrams*, Materials Park, Ohio: ASM International, 1999.
 - [92] Amtsblatt der Europäischen Union, *RICHTLINIE 2011/65/EU zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten*, Brüssel: Europäische Union, 2011.
 - [93] H. Bell, *Reflowlöten - Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler*, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2005.
 - [94] O. Deubzer, H. Griesse und T. Suga, „Lead-free soldering - future aspects of toxicity, energy and resource consumption,“ in *Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, 2001.
 - [95] F. Müller-Gliesmann, *Reduzierung der thermischen Belastung und Verbesserung der Lötstellenqualität beim bleifreien Löten*, Mannheim: Hochschule Mannheim, 2011.
 - [96] R. J. Klein-Wassink, *Weichlöten in der Elektronik*, Saulgau: Leuze Verlag, 1991.
 - [97] L. Stepien, „3D-Druck von Polymeren mit Integrierter Elektronik und Sensorik,“ *Fraunhofer IWS Jahresbericht 2016*, pp. 24-25, 2016.
 - [98] M. Waßmer, *Inkjet-Druck passiver elektronischer Dickschichtbauelemente*,

- Dissertation, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2011.
- [99] N. Salk, „Bauteile mit zusätzlichen Funktionen im Siebdruckverfahren herstellen,“ *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 96, Nr. 11/12, pp. 877-878, 2006.
- [100] H. Grumm, *Schablonendruck - der Schlüsselprozess in der SMT - Fertigung*, Ottobrunn-Riemerling: Christian Koenen GmbH – HighTech Stencils, 2008.
- [101] IPC/JEDEC, *J-STD-020C Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devices*, Arlington/Northbrook: www.ipc.org, 2004.
- [102] H. Bell, H. Berek, H. Herwig, A. Moschallski und M. Nowotnick, „Inline-Kondensationslöten,“ in *DVS/GMM Fachbericht EBL 2002*, Fellbach, 2002.
- [103] U. Filor, „Wie funktioniert Dampfphasenlöten,“ *productronic*, Bd. 410, Nr. 9, pp. 8-9, 2002.
- [104] A. Géczy, I. Balázs und I.-V. Zsolt, „Modeling method of heat transfer during Vapour Phase Soldering based on filmwise condensation theory,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 67, pp. 1145-1150, 2013.
- [105] H. Öttl, „What are the benefits of soldering with vacuum profiles? – Part 2,“ Rehm Thermal Systems GmbH, Blaubeuren-Seissen, 2015.
- [106] M. Pecht, „The Influence of Temperature on Microelectronic Device Failure Mechanisms,“ Ramsearch Company, Crofton, MD, 1993.
- [107] L. Stiny, *Passive elektronische Bauelemente*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- [108] Y. Shabany, *Heat Transfer: Thermal Management of Electronics*, Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2010.
- [109] M. Nowotnick, *Zuverlässigkeit stoffschlüssiger Fügeverbindungen für Hochtemperatur-Elektronikbaugruppen*, Rostock: Universitätsdruckerei Rostock, 2006.
- [110] MG Chemicals, *Datenblatt: SAC305 Lead Free Solder (No Clean) 4900–4917 Technical Data Sheet*, Burlington: www.mgchemicals.com, 2017.
- [111] J. Kinast, E. Hilbert, R.-R. Rohloff, A. Gebhardt und A. Tünnermann, „Thermal expansion coefficient analyses of electroless nickel with varying phosphorous concentrations,“ *Surface and Coatings Technology*,

- Bd. 259, pp. 500-503, 2014.
- [112] D. Sautter und H. Weinerth, Lexikon Elektronik und Mikroelektronik, Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [113] VDE, DIN EN 60216-1:2014-01 Elektroisierstoffe - Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens - Teil 1: Warmlagerungsverfahren und Auswertung von Prüfergebnissen, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [114] T. Hannach, Ermittlung von Lebensdauergleichungen vom Coffin-Manson- und Morrowtyp für bleihaltige und bleifreie Weichlote durch Kombination von FE und Experiment, Dissertation, Berlin: TU Berlin, 2009.
- [115] V. Getkin, A. Bar-Choen und J. Ames, „Coffin–Manson Fatigue Model of Underfilled Flip-Chips,“ *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Bd. 20, Nr. 3, pp. 317-326, 1997.
- [116] Y. Kariya und M. Otsuka, „Mechanical Fatigue Characteristics of Sn-3.5Ag-X(X=Bi, Cu, Zn and In) Solder Alloys,“ *Journal of Electronic Materials*, Bd. 27, Nr. 11, pp. 1229-1235, 1998.
- [117] R. Blish, „Temperature Cycling and Thermal Shock Failure Rate Modeling,“ in *35th Annual Proceedings of Reliability Physics Symposium*, Denver, CO, 1997.
- [118] S. L. Schmitt, Einfluss von Betauung und Feuchteadsorption auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen, Dissertation, München: Herbert Utz Verlag, 1999.
- [119] GMM VDE/VDI, Schulungsblätter für die Leiterplattenfertigung, Frankfurt a.M.: Fachausschuß „Leiterplattenfertigung" (FA 5.2), 1999.
- [120] R. P. Feynman, The Feynman Lectures on Physics, Volume I, 4-1, United States: Addison-Wesley, 1964.
- [121] H. Lütgerath, „www.leifiphysik.de,“ Joachim Herz Stiftung, 2018. [Online]. Available:
https://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/Energieformen_Bild_6.svg.
- [122] H. Stroppe, Physik - Für Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften, München: Carl Hanser Verlag, 2003.
- [123] U. Harten, Physik - Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 7., bearbeitete und aktualisierte Auflage Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer

- Vieweg, 2017.
- [124] H. Herwig, Wärmeübertragung - Ein nahezu allgegenwärtiges Phänomen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [125] N. Hannoschöck, Wärmeleitung und -transport - Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung, Berlin: Springer Verlag, 2018.
- [126] M. Wutz, Wärmeabfuhr in der Elektronik, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1991.
- [127] M. Rudolph und H. Schaefer, Elektrothermische Verfahren, Berlin: Springer Verlag, 1989.
- [128] W. Daoush, A. Swidan, G. A. El-Aziz und M. Abdelhalim, „Fabrication, Microstructure, Thermal and Electrical Properties of Copper Heat Sink Composites,“ *Materials Sciences and Applications*, Bd. 7, Nr. 9, p. 542–561, 2016.
- [129] H. K. Juwhari, A. Zihlif, Z. Elimat und G. Ragosta, „A study on the DC-electrical and thermal conductivities of epoxy/ZnO composites doped with carbon black,“ *Radiation Effects and Defects in Solids*, Bd. 169, Nr. 6, pp. 560-572, 2014.
- [130] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman und A. S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- [131] M. C. Knirsch, C. Alves dos Santos, A. A. Martins de Oliveira Soares Vicent und T. C. Vessoni Penna, „Ohmic heating – a review,“ *Trends in Food Science & Technology*, Bd. 21, Nr. 9, pp. 436-441, 2010.
- [132] C. Kramer, Praxishandbuch Thermoprozess-Technik, Essen: Vulkan-Verlag, 2002.
- [133] J. Neubert, A. Rost und H. Lipson, „Self-Soldering Connectors for Modular Robots,“ *IEEE Transactions on Robotics*, Bd. Vol. 30, Nr. No. 6, 2014.
- [134] Ticer Technologies, *Next Generation Integrated Thin Film Resistor*, Chandler, AZ: www.ticertechnologies.com, 2007.
- [135] Ohmega Technologies Inc., *OhmegaPly® Product Selection Guide*, Culver City, CA: www.ohmega.com, 2015.
- [136] J. Wang, B. Greenlee, R. Hilburn und S. Clouser, „Manufacturing Embedded Resistors,“ www.ticertechnologies.com, Eastlake, 2015.
- [137] B. P. Mahler, *Printed Circuit Board Embedded Thin Film Resistors, Präsentation*, Honolulu, Hawaii: Ohmega Technologies, Inc., 2017.
- [138] D. Seehase, Herstellung und Charakterisierung eines Heizers mit integrierten

- Temperaturfühler in Dünnschichttechnik, Diplomarbeit, Rostock: Universität Rostock, 2011.
- [139] D. Sehease, F. Bremerkamp und M. Nowotnick, „Thin Film Structures on Ceramic Substrates as a small Heating and Temperature Measurement Application,“ in *Internationaler Fachkongress MicroCar2013*, Leipzig, 2013.
- [140] G. Radosavljevic und W. Smetana, „Printed Heater Elements,“ in *Printed Films*, Wien, Woodhead Publishing, 2012, pp. 429-468.
- [141] M. Luniak, *Anwendung polymerer Dickschichtpasten, Präsentation*, Dresden: TU Dresden, 2016.
- [142] J.-P. Jürgens, S. Forero, H. Bleier, G. Herrmann, E. Schmelzer und J. Raithel, „Ergebnisbericht: Energieeffizientes konturnahes 3D Werkzeugtemperiersystem für die Herstellung von Formteilen aus Faserverbundwerkstoffen,“ BMBF, Bremen, 2015.
- [143] M. Varga, P. Wolff und K.-J. Wolter, „Biocompatibility study of three distinct carbon pastes for application as electrode material in neural stimulations and recordings,“ *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, Bd. 28:30, 2017.
- [144] A. Wego, Entwicklung einer thermopneumatischen Mikromembranpumpe auf Basis der Leiterplattentechnologie, Dissertation, Rostock: Universität Rostock, 2001.
- [145] P. D. Wolfarth, „Self-Heating Circuit Board“. USA Patent 6,396,706 B1, 28 Mai 2002.
- [146] H. E. Henschen, M. J. McKee und J. M. Pawlikowski, „Self Regulating Temperature Heater as an Integral Part of a Printed Circuit Board“. USA Patent 5,010,233, 23 April 1991.
- [147] R. S. Aoki, J. W. Thibado, J. L. Smalley, D. J. Llapitan, T. A. Boyd, H. R. Kofstad, D. Ziakas und H. Yan, „Rework Grid Array Interposer with direct Power“. USA Patent US 10,211,120 B2, 19 Februar 2019.
- [148] Embro GmbH, „www.embro-tech.de,“ [Online]. Available: <http://www.embro-tech.de/elektrische-flexible-heizelemente.html>.
- [149] E. P. Simon, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner und K.-D. Lang, „Novel Approach for Integrating Electronics into Textiles at Room Temperature using a Force-Fit Interconnection,“ in *18th European Microelectronics & Packaging Conference*, Brighton, UK, 2011.

- [150] F. Bremerkamp, T. D. Bui, M. Nowotnick und D. Seehase, „Behaviors of Printed Circuit Boards due to Microwave Supported Curing Process of Coating Materials,“ *The Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, Bd. 46, Nr. 2, 2012.
- [151] A. Rahn, Spezielle Reflowprozesse, Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2017.
- [152] S. Sakuyama, H. Uchida, I. Watanabe, K. Natori und T. Sato, „Reflow soldering using selective infrared radiation,“ in *Proceedings of 1995 Japan International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, Omiya, Japan, 1995.
- [153] K.-J. Matthes, Fügetechnik: Überblick - Löten - Kleben - Fügen durch Umformen, Leipzig: Carl-Hanser-Verlag, 2003.
- [154] S. Zhao, J. Wang, X. Du, J. Wang, R. Cao, Y. Yin, X. Zhang, Z. Yuan, Y. Xing, D. Y. H. Pui und C. Li, „All-Nanofiber-Based Ultralight Stretchable Triboelectric Nanogenerator for Self-Powered Wearable Electronics,“ *ACS Applied Energy Materials*, Bd. 1, Nr. 5, pp. 2326-2332, 2018.
- [155] T. Herold, T. Adam, I. Martinek, K. Kußmaul, K. Zuckerschwerdt und M. J. Greitmann, „Ultraschall-Nahtschweißen von Aluminiumwerkstoffen,“ *Schweißen und Schneiden*, Bd. 50, Nr. 12, pp. 772-775, 1998.
- [156] W. Sextro und M. Brökelmann, Intelligente Herstellung Zuverlässiger Kupferbondverbindungen: Abschlussbericht Zum Spitzenclusterprojekt InCuB., Berlin: Springer-Verlag, 2018.
- [157] M. Kaviany, Phonon Energy Storage, Transport, and Transformation Kinetics, Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [158] RoteK Handels GmbH, *Glasfaser-Hartgewebe HGW2372.1 (FR4-HF)*, *Datenblatt*, Hagenbrunn: www.rotek.at, 2008.
- [159] R. Kaiser und I. Hennig, Physikalische Chemie für die Sekundarstufe II, 9., durchges. Aufl. Hrsg., Bad Homburg vor der Höhe: Verlag Gehlen, 1999.
- [160] F. Bremerkamp, M. Nowotnick und D. Seehase, „Entwärmungskonzepte für elektronische Komponenten und Baugruppen der Leistungselektronik auf Grundlage von Phasenumwandlungsprozessen,“ *PLUS*, Nr. 10, 2012.
- [161] P. K. Mahto, R. Chaudhary, S. Chowdhury, M. Alham und S. R. Dutta, „Development of PCM (paraffin wax) based Latent heat Storage type Solar powered Thermo-electric generator,“ *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Nr. 377, 2018.

- [162] G. Hemken und C. Walz, „Einsatz von reaktiven Multischichten zum Fügen von Elektronikkomponenten,“ in *DVS-Berichte 301 EBL 2014*, Fellbach, 2014.
- [163] J. P. Levin, T. R. Rude, J. Subramanian und et.al, „Room Temperature Lead-Free Soldering of Microelectronic Components using a Local Heat Source,“ *ASM Conference Proceedings: Joining of Advanced and Specialty Materials*, pp. 75 - 79, 2004.
- [164] A. Mann, A. Gavens, M. Reiss, D. Van Heerden, G. Bao und T. Weihs, „Modeling and characterizing the propagation velocity of exothermic reactions in multilayer foils,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. 82, Nr. 3, pp. 1178-1188, 1997.
- [165] Indium Corporation, „NanoFoil® preforms,“ [Online]. Available: <https://www.indium.com/nanofoil/preforms/#products>. [Zugriff am 28. Februar 2019].
- [166] D. Seehase, H. Huth, A. Neiser und M. Nowotnick, „Reactive Paste for Reflow Soldering of Large Components,“ in *37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, Dresden, 2014.
- [167] C. Mauney, „Thermal Considerations for Surface Mount Layouts,“ 2005. [Online]. Available: <http://www.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%2010%20-%20Thermal%20Design%20Consideration%20for%20Surface%20Mount%20Layouts%20.pdf?HQS=gma-indu-motr-mdrvblog-150422-thermal-mc-en>. [Zugriff am 02 April 2019].
- [168] J. R. Culham und M. M. Yovanovich, „Factors Affecting the Calculation of Effective Conductivity in Printed Circuit Boards,“ in *1998 Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Piscataway, 1998.
- [169] K. Azar und J. E. Graebner, „Experimental Determination of Thermal Conductivity of Printed Wiring Boards,“ in *Twelfth IEEE SEMI-THERM Symposium*, Austin, TX, 1996.
- [170] Y. Shabany, „Component size and effective thermal conductivity of printed circuit boards,“ in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, San Diego, CA, 2002.
- [171] E. M. Dede, P. Schmalenberg, T. Nomura und M. Ishigaki, „Design of Anisotropic Thermal Conductivity in Multilayer Printed Circuit Boards,“ *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Bd. 5, Nr. 12, pp. 1763-1774, 12

Dezember 2015.

- [172] J. Lutz, Halbleiter- Leistungsbaulemente, Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [173] T. Simon, Temperaturbestimmung an IGBTs und Dioden unter hohen Stoßstrombelastungen, Chemnitz: TU Chemnitz, 2015.
- [174] Y. Fan, C. Winkel, D. Kulkarni und W. Tian, „Analytical Design Methodology for Liquid Based Cooling Solution for High TDP CPUs,“ in *17th IEEE Intersociety Conference 2018*, San Diego, CA, 2018.
- [175] D. Seehase, F. Bremerkamp, H. Huth und M. Nowotnick, „Energetic Analysis of Solder Paste Deposits as Reference for Soldering with Selective Heat,“ in *Proceedings of International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Bad Aussee, 2012.
- [176] Seho Systems GmbH, *Messdaten zur Leistungsaufnahme einer Zwangskonvektionslötanlage (MaxiReflow 3.6)*, Kreuzwertheim: (Persönliche Mitteilung durch A. Neiser), 2019.
- [177] A. Neiser, D. Seehase, P. Koschorrek und A. Reinhardt, „Control a Joule-Heating Embedded Layer within a Printed Circuit Board,“ in *Proceedings of 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, Dresden, 2018.
- [178] A. Neiser, D. Seehase und A. Reinhardt, „Self-Heating Printed Circuit Board - A Challenge to Contact and Control for a Reflow Soldering Process,“ in *Proceedings of 41st International Spring Seminar on Electronics Technology*, Zlatibor, 2018.
- [179] M. Weidmann, *Burn-In-Test zur Voralterung von elektronischen Baugruppen, Präsentation*, Wetzikon: ad+t AG, 2012.
- [180] M. Nowotnick, *Zuverlässigkeit von Lötverbindungen - AVT für die Leistungselektronik, Präsentation*, Dresden: Universität Rostock, 2011.
- [181] H. Rebholz, *48 V Bordnetzsysteme - Die nächste Generation der Spannungsversorgung?*, Konstanz: Hochschule Konstanz, 2017.
- [182] H.-J. Peter, *Handbuch Induktives Löten*, Berlin: Hans-Joachim Peter Verlag, 2014.
- [183] J. Neumeyer, C. Groth, J. Wibbeler und M. Hanke, „FE-Simulation des induktiven Härtens am Beispiel einer Kalandrierwalze,“ *Journal of Heat Treatment Materials*, Bd. 71, pp. 43-50, 2016.
- [184] W. Brunst, *Die induktive Wärmebehandlung*, Berlin/Göttingen/Heidelberg:

Springer Verlag, 1957.

- [185] D. Halliday, R. Resnick und J. Walker, Halliday Physik, Berlin: Wiley-VCH, 2017.
- [186] M. Albach, Grundlagen der Elektrotechnik I, München: Pearson Studium, 2011.
- [187] M. C. Levin, Dissertation: Charakterisierung von weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen für den Einsatz in Traktionsantrieben, München: TU München, 2012.
- [188] C. P. Steinmetz, „On the Law of Hysteresis,“ in *Proceedings of the IEEE* 72(2): 197-221, 1984.
- [189] Z. Neuschl, Dissertation: Rechnerunterstützte experimentelle Verfahren zur Bestimmung der lastunabhängigen Eisenverluste in permanentmagnetisch erregten elektrischen Maschinen mit additionallem Axialfluss, Žiar nad Hronom: TU Cottbus, 2007.
- [190] W.-R. Canders, „Berechnung von Eisenverlusten - Physikalisch Basierter Ansatz nach Bertottis Theorie,“ in *IMAB Jahresbericht 2010/11*, Braunschweig, IMAB - TU Braunschweig, 2010, pp. 1 - 15.
- [191] Y. Zhang, M.-C. Cheng und P. Pillay, „Magnetic Characteristics and Excess Eddy Current Losses,“ in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Houston, 2009.
- [192] H. Jordan, Die ferromagnetischen Konstanten für schwache Wechselfelder, Berlin: Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG), 1924.
- [193] G. Bertotti, „General properties of power losses in soft ferromagnetic materials,“ *IEEE Transactions on Magnetics*, Bd. 24, pp. 621-630, 1988.
- [194] L. Semiati und S. Zinn, Elements of Induction Heating - Design, Control, and Applications, Palo Alto: Carnes Publication Services, 2002.
- [195] C. Heck, Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung, Heidelberg: Alfred Hüthig Verlag, 1975.
- [196] E. Baake, „Induktives Schmelzen von Eisen- und Nichteisenwerkstoffen,“ www.prozesswaerme.net, pp. 77-80, 12. November 2018.
- [197] Wolf Produktionssysteme GmbH, „Prospekt: Speziallöttechnik,“ www.wolf-produktionssysteme.de, Freudenstadt, 2015.
- [198] mta automation inc., „Prospekt: Selective Soldering Solutions,“ www.unitechnoliges.com, Old Sybrook, 2017.
- [199] EUTECT GmbH, „Prospekt: Induktionslöten - Schnell u. Kontrolliert,“ www.eutect.de, Dusslingen, 2014.

- [200] H. A. Trucco, „Inductive Self-Soldering Printed Circuit Board“. USA Patent 6229124 B1, 8. Mai 2001.
- [201] S. Iriguchi, K. Hatanaka, S. Watanabe, N. Taketomi, K. Yamamoto und M. Sugie, „Method of repair of electronic device and repair system“. USA Patent US 8,456,854 B2, 4. June 2013.
- [202] M. Li, H. Xu, S.-W. R. Lee, J. Kim und D. Kim, „Eddy Current Induced Heating for the Solder Reflow of Area Array Packages,“ *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Bd. 31, Nr. 2, pp. 399 - 403, 2008.
- [203] T. H. McGaffigan, „Method, System and Composition for Soldering by Induction Heating“. USA Patent 5.093.545, 3. März 1992.
- [204] A. B. Suppelsa, „Auto-Regulating Solder Composition“. USA Patent 5.573.859, 12. November 1996.
- [205] A. H. Habib, M. G. Ondeck, K. J. Miller, R. Swaminathan und M. E. McHenry, „Novel Solder-Magnetic Particle Composites and Their REflow Using AC Magnetic Fields,“ *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Bd. 46, Nr. 6, pp. 2187-2190, 2010.
- [206] C. Mazón-Valadez, L. H. Quintero-Hernández, E. E. Mazón-Valadez, A. Hernández-Sámano, J. Ávila-Paz und M. E. Cano-González, „Developing a self-regulating soldering iron based on induction heating,“ *DYNA*, Bd. 83, Nr. 196, pp. 159-167, 2016.
- [207] C. Kohlen, „Verfahren zur lokalen Erwärmung von Strukturen in Leiterplatten mittels Induktion,“ Uni Rostock, Rostock, 2016.
- [208] Fairchild Semiconductor, „AN9012 - Induction Heating System Topology Review,“ www.fairchildsemi.com, 2000.
- [209] Posco, „Electrical Steel, Datenblatt,“ 2014. [Online]. Available: http://www.posco.com/homepage/docs/eng5/dn/company/product/e_electrical_pdf_2011.pdf. [Zugriff am 15. April 2019].
- [210] C. Mavriplis, „Effect of Magnetic Field Dynamics on the Copper-Constantan Thermocouple Performance,“ *Instrumentation Science & Technology*, Bd. 33, pp. 661-671, 2005.
- [211] L. Zhang, J.-J. Guo, A.-P. Xian und J. Shang, „Solderability of Ni, Fe elemental and alloy platings by SnAgCu,“ in *International Symposium on High Density Design Packaging and Microsystem Integration*, Shanghai, China, 2007.
- [212] VAC Vacuumschmelze, „ULTRAVAC® 44 V6, Datenblatt,“ April 2012. [Online].

- Available: <http://60450c0c7af95f51.lolipop.jp/VAC/wp-content/uploads/Ultravac-2-1.pdf>. [Zugriff am 15. April 2019].
- [213] VAC Vacuumschmelze, „Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge,“ <http://www.vacuumschmelze.com>, Hanau, 2002.
- [214] N. Becker, J. Hadick und J. Fasholz, Induktive Erwärmung : physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, Essen: RWE Energie, 1991.
- [215] A. Mangroli und K. Vasoya, „Optimizing thermal and mechanical performance in PCBs,“ *Global SMT & Packaging*, Nr. 12, pp. 10-11, 2007.
- [216] H. Wohlrabe, K. Meier und O. Albrecht, „Influences of SMD Package and Substrate Warpage on Quality and Reliability –Measurement, Effects and Counteractions,“ in *Proceedings of 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, Dresden, 2018.
- [217] O. Eckert, Messtechnische Charakterisierung von Anlauf-farben auf niedriglegierten Stählen, Brandenburg: FH Brandenburg, 2008.
- [218] Metalcor GmbH, *Datenblatt: Alloy 42 (1.3917)*, Essen: www.metalcor.de, 2014.
- [219] Metalcor GmbH, *Datenblatt: Alloy K (1.3981)*, Essen: www.metalcor.de, 2016.
- [220] E. Pusch, Elektrische Heizleitungen - Bauarten, Einsatz, Verarbeitung, Berlin: Verlag Technik, 1997.
- [221] A. S. Kashin und V. P. Ananikov, „A SEM study of nanosized metal filmsand metal nanoparticles obtained by magnetron sputtering,“ *Russian Chemical Bulletin*, Bd. 60, Nr. 12, pp. 2602-2607, 2011.
- [222] DuPont, „Präsentation: DuPont Kapton® RS - Engineered Resistive Substrate Film,“ www.flexinterconnect.com, 2017.
- [223] H. Greif, A. Limper und G. Fattmann, Technologie der Extrusion, München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [224] A. Krueger, Carbon Materials and Nanotechnology, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010.
- [225] DuPont, „Datenblatt: DUPONT™ KAPTON® 200RS100,“ 2017.
- [226] thermo Heating Elements, „Datenblatt: Conductive Kapton®,“ Piedmont, 2008.
- [227] C. C. Rocker, The Study and Application of Carbon Nanotube Film Heaters for Space Applications; Thesis, Ohio: US Air Force, 2018.
- [228] J. Kwon, J. Kim, J. Lee, P. Han, D. Park und H. Han, „Fabrication of Polyimide Composite Films Based onCarbon Black for High-Temperature Resistance,“ *Polymer Composites*, Bd. 35, Nr. 11, pp. 2214-2220, 2014.

- [229] R. Taheri, Dissertation: Evaluation of Electroless Nickel-Phosphorus (EN) Coatings, Saskatoon: University of Saskatchewan, 2003.
- [230] C.-C. Hu und A. Bai, „Composition control of electroplated nickel-phosphorus deposits,“ *Surface and Coatings Technology*, Nr. 137, pp. 181 - 187, 2001.
- [231] R. Parkinson, Properties and applications of electroless nickel, Nickel Development Institute, 1997.
- [232] A. Iizuka, T. Higashikawa und T. Osaka, „Preparation and Properties of high Resistivity Electroless NiP Films,“ in *Proceedings of the third Symposium on Electrochemically deposited thin films*, Pennington, 1997.
- [233] J. Borecki, „Applying of Thin Layer Resistors in Multilayer Printed Circuit Board,“ in *Proceedings of Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Wilga, 2006.
- [234] R. Dietrich und J. Tekath, „Referat 148: Carbon-Leitlacke - Einsatzgebiete, Rationalisierungs- und Kosteneinsparungspotentiale,“ Lackwerke Peters, Kempen, 2015.
- [235] Lackwerke Peters, „Datenblatt: Carbon-Leitlack SD 2842 HAL,“ www.peters.de, Kempen, 2017.
- [236] Lackwerke Pters, „Datenblatt: 1-Komponenten-Carbon-Leitlack SD 2843 HAL,“ www.peters.de, Kempen, 2008.
- [237] DYCOTEC Materials, *Datenblatt: CAP-4001-SP*, Swindon, Wiltshire UK: www.dycotecmaterials.com, 2016.
- [238] D. Pantea, H. Darmstadt, S. Kaliaguine und C. Roy, „Electrical conductivity of conductive carbon blacks: influence of surface chemistry and topology,“ *Applied Surface Science*, Nr. 217, pp. 181-193, 2003.
- [239] K. Hilarius, Elektrische und rheologische Eigenschaften von kohlenstoffbasierten Füllstoffnetzwerken in Polymeren, Dissertation, Darmstadt: TU Darmstadt, 2014.
- [240] C. Phillips, A. Al-Ahmadi, S.-J. Potts, T. Claypole und D. Deganello, „The effect of graphite and carbon black ratios on conductive ink performance,“ *Journal of Materials Science*, Bd. 52, Nr. 16, pp. 9520-9530, 2017.
- [241] Bare Conductive, *Datenblatt: ELECTRIC PAINT*, London, UK: www.bareconductive.com, 2016.
- [242] Shimadzu, *Measuring Sulfur Content in Carbon Black using Shimadzu EDX-720 Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrophotometer*, Columbia, MD:

- www.ssi.shimadzu.com, 2011.
- [243] W. W. Flack, D. S. Soong, A. T. Bell und D. W. Hess, „A mathematical model for spin coating of polymer resists,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. 56, Nr. 4, pp. 1199-1206, 1984.
- [244] Ossila, „Spin Coating: A Guide to Theory and Techniques,“ [Online]. Available: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating#aggregation-and-filtration>. [Zugriff am 16 März 2019].
- [245] R. Green, A. Morfa, A. J. Ferguson, N. Kopidakis, G. Rumbles und S. E. Shaheen, „Performance of bulk heterojunction photovoltaic devices prepared by airbrush spray deposition,“ *Applied Physics Letters*, Nr. 92, 2008.
- [246] A. Abdellah, B. Fabel, P. Lugli und G. Scarpa, „Spray deposition of organic semiconducting thin-films: Towards the fabrication of arbitrary shaped organic electronic devices,“ *Organic Electronics*, Nr. 11, p. 1031–1038, 2010.
- [247] Specac, *Handbuch: Atlas™ Manual 15Ton (15T) and 25Ton (25T) Hydraulic Press*, Fort Washington: www.specac.com, 2016.
- [248] ITEQ Corporation, *Datenblatt: IT-180*, ITEQ.
- [249] MSC-Polymer, *Datenblatt: Thermo-350 (Presspolster)*, Staufenberg-Mainzlar: www.msc-polymer.com, 2014.
- [250] MSC-Polymer, *Datenblatt: UTF-100(Trennfolie)*, Staufenberg-Mainzlar: www.msc-polymer.com, 2016.
- [251] P. J. Cote, „Electrical RESistivity of Amorphous Nickel Phosphorus Alloys,“ *Solid State Communication*, Bd. 18, p. 1976, 1311-1313.
- [252] P. Wissmann und H.-U. Finzel, *Electrical Resistivity of Thin Metal Films*, Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [253] R. M. Allen und J. B. VanderSande, „Structure Of Electroless Ni-P Films As a Function of Composition,“ *Scripta Metall*, Bd. 16, pp. 1161-1164, 1982.
- [254] M. Müller, Dissertation: Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung, Stuttgart: Herbert Utz Verlag, München, 2002.
- [255] M. Nowak, A. Antonczak, P. Koziol und K. Abramski, „Laser prototyping of printed circuit boards,“ *OPTO-ELECTRONICS REVIEW*, Bd. 3, Nr. 21, pp. 320 - 325, 2013.

- [256] R. Rozman, B. Kmetec, B. Podobnik, D. Kovacic und E. Govekar, „Optimisation of direct laser structuring of printed circuit boards,“ *Applied Surface Science*, Bd. 254, Nr. 17, pp. 5524-5529, 2008.
- [257] M. Alafogianni, R. Penlington und M. Birkett, „Resistor trimming geometry; past, present and future,“ in *39th International Microelectronics and Packaging IMAPS Poland 2015 Conference*, Gdansk, 2015.
- [258] LPKF, *Flyer: ProtoLaser S - Inhouse-Prototyping der nächsten Generation*, Garbsen: www.lpkf.de, 2018.
- [259] P. Rudolph, Physikalische Chemie der Laser-Material-Wechselwirkung mit Ba-Al-Borosilikatglas, AlN, SiC, SiC-TiC-TiB₂, Dissertation, Berlin: FU Berlin, 2002.
- [260] E. Schmachtenberg, R. Feulner, D. Rietzel und B. Wendel, „Wechselwirkungen Kunststoff - Laserprozess,“ *Zeitschrift Kunststofftechnik - Journal of Plastics Technology*, Bd. 4, Nr. 3, pp. 1 - 20, 2008.
- [261] O. Klemp, M. Hueske, I. Rolfes und H. Eul, „On the Application of a Novel Laser-Based Rapid Prototyping Process for Planar Antenna Elements,“ in *Proceedings of the 36th European Microwave Conference*, Manchester, 2006.
- [262] P. Balu, E. Rea und J. Deng, „Laser cladding of nickel-based alloy coatings on copper substrates,“ in *Proceedings Volume 9657, Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)*, Kenilworth, 2015.
- [263] DuPont, *Datenblatt: DuPont Series 17 Resistors*, <http://mcm.dupont.com>, 2013.
- [264] T. Lee, L. Lach und G. J. Dunn, „Printed Circuit Board with a Multilayer integral Thin-Film Metal Resistor and Method therefor“. USA Patent US 6194990 B1, 27 Februar 2001.
- [265] CCI Eurolam, *Verarbeitungsempfehlung Ohmega ply(R)*, Dreieich: www.ccieurolam.com/de, 2010.
- [266] H. Al-Allak, A. W. Brinkman und J. Woods, „I-V characteristics of carbon black-loaded crystalline polyethylene,“ *Journal of Materials Science*, Bd. 28, pp. 117-120, 1993.
- [267] J. Meyer, „Glass Transition Temperature as a Guide to Selection of Polymers Suitable for PTC Materials,“ *Polymer Engineering and Science*, Bd. 13, Nr. 6, pp. 462-468, 1973.
- [268] M. Narkis, A. Ram und Z. Stein, „Electrical Properties of Carbon Black Filled

- Crosslinked Polyethylene," *Polymer Engineering and Science*, Bd. 21, Nr. 16, pp. 1049-1054, 1981.
- [269] A. Voet, „Temperature Effect of Electrical Resistivity of Carbon Black Filled Polymers," *Rubber Chemistry and Technology*, Bd. 54, Nr. 1, pp. 42-50, 1981.
- [270] M. Rahaman, T. K. Chaki und D. Khastgir, „Control of the temperature coefficient of the DC resistivity in polymer-based composites," *Journal of Material Science*, Bd. 48, pp. 7466-7475, 2013.
- [271] W. Stepkowski, T. Serzysko, G. Koziol und A. Dziedzic, „Preliminary assessment of the stability of thin- and polymer thick-film resistor embedded into printed wiring boards," *Microelectronics Reliability*, Bd. 52, pp. 1719-1725, 2012.
- [272] L. Dellis, M. S. Chan, T. Dueber, S. Fang und J. Summers, „Thick Film Polymer Resistors Embedded in Printed Circuit Boards," [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/a3f2/138e920d02217ae1e106aba0d0055a885cf4.pdf>.
- [273] M. Rauer, Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden, Dissertation, Erlangen: FAU University Press, 2018.
- [274] F. Mücklich, M. Hans und R. Gales, „ED-Kupferfolien für Leiterplatten und Li-Ionen- Batterien: Herstellung und Trends," *Metall*, Bd. 64. Jahrgang, Nr. 11, pp. 525-530, 2010.
- [275] K. Gaw, M. Kikei, M.-a. Kakimoto und Y. Imai, „Preparation of Polyimide-Epoxy Composites," *Reactive & Functional Polymers*, Nr. 30, pp. 85 - 91, 1996.
- [276] ASTM International, „ASTM D 3359 – 09 Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test," West Conshohocken, 2010.
- [277] N. C. Stoffel, M. Hsieh, E. J. Kramer und W. Volksen, „Adhesion Enhancement Lamination of Polyimide Filmis," *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Bd. 19, Nr. 2, pp. 417-421, 1996.
- [278] M. Danziger und W. Voituz, „Surface modification of polyimide to improve its adhesion to deposited copper layer," *Polyimides and Other High Temperature Polymers*, Bd. 2, pp. 315-329, 2003.
- [279] XYZTEC B.V., „condor EZ flyer," XYZTEC, 2010. [Online]. Available:

- <http://www.xyztec.com>. [Zugriff am 10. 12. 2018].
- [280] Omega, *Datenblatt: 5SC - Installationsfertige, isolierte Drahtthermoelemente mit Subminiatur-Stecker und integrierter Zugentlastung/Spule*, Deckenpfronn: www.omega.de, 2003.
- [281] globalPoint ICS, *Specification PTP® Electronics*, Wertheim: www.gp-ics.com , 2018.
- [282] Omega, *Datenblatt: TC-08 - 8-Kanal-USB-Datenerfassungsmodul für Thermoelemente*, Deckenpfronn: www.omega.de, 2011.
- [283] Testo SE & Co. KGaA, *Datenblatt: Wärmebildkamera - testo 882*, Lenzkirch: www.testo.de, 2019.
- [284] Optris GmbH, *Datenblatt: optris® PI 200 / 230 Technische Daten*, Berlin: www.optris.de, 2018.
- [285] J. Li, „Negative temperature coefficient of PVC filled with carbon black,“ *Advanced Materials Research*, Bd. 301, pp. 1128-1132, 2011.
- [286] J. Zhang und S. Feng, „Temperature effects of electrical resistivity of conductive silicone rubber filled with carbon blacks,“ *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 90, Nr. 14, pp. 3889-3895, 2003.
- [287] A. Marquez, J. Uribe und R. Cruz, „Conductivity variation induced by solvent swelling of an elastomer-carbon black-graphite composite,“ *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 66, pp. 2221-2232, 1997.
- [288] M. C. Lonergan, E. J. Severin, B. J. Doleman, S. A. Beaber, R. H. Grubbs und N. S. Lewis, „Array-Based Vapor Sensing Using Chemically Sensitive, Carbon Black-Polymer Resistors,“ *Chemistry of Materials*, Bd. 8, Nr. 9, pp. 2298-2312, 1996.
- [289] J. Anderson und M. Altan, „Formation of voids in composite laminates: Coupled effect of moisture content and processing pressure,“ *Polymer Composites* , Bd. 36, Nr. 2, pp. 376-384, 2015.
- [290] Schuetz Messtechnik, *Datenblatt: MR 1012 S Milli-Ohmmeter*, Teltow: www.ohmmeter.de, 2010.
- [291] Vötsch Industrietechnik GmbH, *Klima-prüfschränke "VCS 7150"*, Balingen: www.voetsch-technik.info, 2016.
- [292] CTS GmbH, *Datenblatt: CTS-Klima-Prüfschränke - CS-40/32 (32 Liter)*, Hechingen: www.cts-umweltsimulation.de, 2015.
- [293] Z. Pruszowski, P. Kowalik, M. Ciez und J. Kulawik, „Influence of solution acidity

- oncomposition, structure and electrical parameters of Ni-P alloys," *Microelectronics International*, Bd. 26, Nr. 2, pp. 24-27, 2009.
- [294] P. Kowalik, Z. Pruszowski, J. Kulawik, A. Czerwinski und M. Pluska, „Changes in TCR of amorphous Ni–P resistive films as a function of thermal stabilization parameters," *Microelectronics International*, Bd. 31, Nr. 3, pp. 149-153, 2014.
- [295] Texas Instruments, *Datenblatt: SN5404, SN54LS04, SN54S04, SN7404, SN74LS04, SN74S04 - HEX INVERTERS*, Dallas, TX: <http://www.ti.com>, 2004.
- [296] Texas Instruments, *Datenblatt: LM78Lxx 100-mA Fixed Output Linear Regulator*, Dallas, TX: www.ti.com, 2016.
- [297] Arlon, *Datenblatt: Arlon 35N - High Performance Polyimide / E-Glass*, Rancho Cucamonga, CA: www.arlonmed.com, 2000.
- [298] Stannol, *Datenblatt: Massive Lötdrähte*, Velbert: www.stannol.de, 2018.
- [299] Indium Corp., *Datenblatt: NC-SMQ®230 Bleifreie Lotpaste*, Chicago: www.indium.com, 2008.
- [300] Loctite, *Datenblatt: Lotpaste GC 10*, www.henkel.com, 2015.
- [301] M. H. Poech und H. Bell, „Gibt es ein optimales Reflow-Profil?," in *GMM-Fachbericht 37: EBL 2002*, Fellbach, 2002.
- [302] XYZTEC, „Condor Sigma Work holders," [Online]. Available: <https://www.xyztec.com/en/condor-sigma/workholders>. [Zugriff am 22.05.2019].
- [303] I. Plotog, G. Varzaru, B. Mihailescu, M. Branzei, A. Bibis und I. Cristea, „Lead/Lead Free Solder Joints Comparative Shear Tests Function of Working Temperature and Soldering Thermal Profile," in *19th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*, Galati, Romania, 2013.
- [304] IPC, *IPC-TM-650 Test Methods Manual - 2.6.26 DC Current Induced Thermal Cycling Test*, Northbrook, IL: IPC, 2001.
- [305] M. Nowotnick, A. Novikov, D. Seehase und C. Kronwald, „Comparison of active und passive Temperature Cycling," in *Proceedings of SMTA International*, Rosemont, IL, 2016.
- [306] IPC, *IPC-TM-650 Test Methods Manual - 2.6.7 Thermal Shock & Continuity, Printed Board*, Northbrook, IL: IPC, 1997.

- [307] Goodfellow GmbH, „Standardpreisliste für Polyimid,“ 12. April 2019. [Online]. Available: http://www.goodfellow.com/pdf/4455_1111010.pdf.
- [308] M. Holst, Reaktionsschwindung von Epoxidharz-Systemen, Dissertation, Darmstadt: TU Darmstadt, 2001.
- [309] F. Arabi, A. Gravia, J.-Y. Deletage und H. Fremont, „Sequential combined thermal cycling and vibration test and simulation of printed circuit board,“ *Microelectronics Reliability*, Bde. %1 von %288-90, pp. 768-773, 2018.
- [310] P. K. Matkowski und J. Felba, „Influence of solder joint constitution and aging process duration on reliability of lead-free solder joints under vibrations combined with thermal cycling,“ in *3rd Electronics System Integration Technology Conference (ESTC 2010)*, Berlin, 2010.
- [311] H. Landolt und R. Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - Magnetic Properties of Metals - Magnetic Alloys for Technical Applications, Heidelberg: Springer Verlag, 1994.
- [312] Vacuumschmelze, *PERMENORM 3601 K5 - firmeninterne Materialdaten*, Hanau, 2005.

VERÖFFENTLICHUNGSLISTE

Als Erstautor

- [E1] Seehase, D.; Huth, H.; Bremerkamp, F.; Nowottnick, M.: Energetic Analysis of Solder Paste Deposits as Reference for Soldering with Selective Heat. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2012), Bad Aussee, Österreich. 09.-13. Mai 2012.

- [E2] Seehase, D.; Bremerkamp, F.; Nowottnick, M.: Thin Film Structures on Ceramic Substrates as a small Heating and Temperature Measurement Application. Internationaler Fachkongress MicroCar 2013, Leipzig, Deutschland. 25.-26. Februar 2013.

- [E3] Seehase, D.; Bremerkamp, F.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Untersuchung der thermo-mechanischen Eigenschaften von bleifreien Hochtemperatur-Lötverbindungen aus Verbundwerkstoffen. MikroSystemTechnik Kongress 2013, Aachen, Deutschland. 14.-16. Oktober 2013

- [E4] Seehase, D.; Huth, H.; Bremerkamp, F.; Nowottnick, M.: Bewertung der Qualität und Zuverlässigkeit von Lötverbindungen von exotherm reagierenden Lotpasten. DVS-Berichte 301 EBL 2014, Fellbach. Deutschland. 11.-12. Februar 2014.

- [E5] Seehase, D.; Huth, H.; Neiser, A.; Nowottnick, M.: Reactive Paste for Reflow Soldering of Large Components. 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2014), Dresden, Deutschland. 07.-11. Mai 2014.

- [E6] Seehase, D.; Lange, F.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Material study for full-faced heating layers, integrated in printed circuit boards. 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2017), Sofia, Bulgarien. 10.-14. Mai 2017.

- [E7] Seehase, D.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Resistance Development on Embedded Heating Layers during Climatic Test. 21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2017), Warschau, Polen. 10.-13. September 2017.

- [E8] Seehase, D.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Herstellung und Bewertung von integrierten Heizstrukturen in Leiterplatten. DVS-Berichte 340 EBL 2018, Fellbach. Deutschland. 20.-21. Februar 2018.

- [E9] Seehase, D.; Kohlen, C.; Neiser, A.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Endogenous Heating of Printed Circuit Boards by Means of Electromagnetic Induction on Suitable Suscep-

tors. 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018), Zlatibor, Serbien. 16.-20. Mai 2018.

- [E10] Seehase, D.; Neiser, A.; Lange, F.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Thermal Characterization of Endogenously Heated Printed Circuit Boards with Embedded Resistive Layers. 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC 2018), Dresden, Deutschland. 17.-20. September 2018.
- [E11] Seehase, D.; Kohlen, C.; Neiser, A.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Selective Soldering on Printed Circuit Boards with Endogenous Induction Heat at Appropriate Susceptors, Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science Journal, Vol.62 No. 4, pp. 172 – 180, 2018.
- [E12] Seehase, D.; Neiser, A.; Maxa, J.; Lange, F.; Novikov, A.; Nowottnick, M.: Alternative Heating Methods for Printed Circuit Boards and a Practical Comparison of Direct Resistance and Inductive Heating Processes, 22nd Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2019), Pisa, Italien. 16.-19. September 2019. (in Vorbereitung)

Als Co-Autor

- [M1] Bremerkamp, F.; Seehase, D.; Nowottnick, M.: Heat Protection Coatings for High Temperature Electronics. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2012), Bad Aussee, Österreich. 09.-13. Mai 2012.
- [M2] Bremerkamp, F.; Nowottnick, M.; Seehase, D.; Bui, T. D.: Behaviors of Printed Circuit Boards due to Microwave Supported Curing Process of Coating Materials. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 46 (Juni 2012), Nr. 2, S. 68-75.
- [M3] Bremerkamp, F.; Seehase, D.; Nowottnick, M.: Selective Cooling of Sensitive PCB Components by means of Silica Gel Based Cover Coatings. 4th Electronics System Integration Technologies Conference (ESTC 2012), Amsterdam, Niederlande. 17.-20. September 2012.
- [M4] Bremerkamp, F.; Nowottnick, M.; Seehase, D.: Entwärmungskonzepte für elektronische Komponenten und Baugruppen der Leistungselektronik auf Grundlage von Phasenumwandlungsprozessen. Produktion von Leiterplatten Und Systemen (PLUS) 10 (2012). S. 2252-2259.

- [M5] Bremerkamp, F.; Seehase, D.; Nowotnick, M.: Enhancement of the thermal management of electronic assemblies by means of a silica gel heat storage system. Internationaler Fachkongress MicroCar 2013, Leipzig, Deutschland. 25.-26. Februar 2013

- [M6] Bui, T. D.; Bremerkamp, F.; Nowotnick, M.; Seehase, D.: Protection of printed circuit board structures in microwave process. 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE 2013), Breslau, Polen. 14.-17. April 2013.

- [M7] Nowotnick, M.; Bremerkamp, F.; Seehase, D.: Silica Gel Coating for Thermal Management of Electronic Components. SMTA International 2013, Fort Worth, Texas, USA. 13.-17. October 2013.

- [M8] Neiser, A.; Seehase, D.; Fink, A.; Lehzen, K.; Beikirch, H.: Thermoelectric Generator for Stand-Alone Electronic Device Operation in Temperature Test Cabinets. 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2014), Dresden, Deutschland. 07.-11. Mai 2014.

- [M9] Neiser, A.; Seehase, D.; Fink, A.; Nowotnick, M.: Placement of embedded temperature sensors in a printed circuit board for a manufacturing process. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015), Eger, Ungarn. 06.-10. Mai 2015.

- [M10] Nowotnick, M.; Seehase, D.; Novikov, A.; Müller, B.; Wormuth, D.; Wittreich, U.: Energieeffiziente Lötprozesse durch autonom schmelzende Lotpasten – ThermoFlux. GMM-Fachbericht 84: EBL 2016, Fellbach. Deutschland. 16.-17. Februar 2016.

- [M11] Nowotnick, M.; Novikov, A.; Seehase, D.; Kronwald, C.: Comparison of Active and Passive Temperature Cycling. SMTA International 2016, Rosemont, Illinois, USA. 25.-29. September 2016.

- [M12] Neiser, A.; Seehase, D.; Reinhardt, A.: Self-Heating Printed Circuit Board - A Challenge to Contact and Control for a Reflow Soldering Process. 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018), Zlatibor, Serbien. 16.-20. Mai 2018.

- [M13] Neiser, A.; Seehase, D.; Koschorrek, P.; Reinhardt, A.: Control a Joule-Heating Embedded Layer within a Printed Circuit Board. 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC 2018), Dresden, Deutschland. 17.-20. September 2018.

- [M14] Neiser, A.; Seehase, D.; Abb, M.; Reinhardt, A.: Wireless Sensor Nodes Optimized for Industrial Soldering Equipment. 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2019), Wroclaw, Polen. 15.-19. Mai 2019.
- [M15] Neiser, A.; Seehase, D.; Reinhardt, A.: The Challenge of a Self-Soldering PCB, 22nd Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2019), Pisa, Italien. 16.-19. September 2019. (in Vorbereitung)

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht und ist in gleicher oder ähnlicher Weise noch nicht als Studienleistung zur Anerkennung oder Bewertung vorgelegt worden. Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Rostock

(Abgabedatum)

(Vollständige Unterschrift)